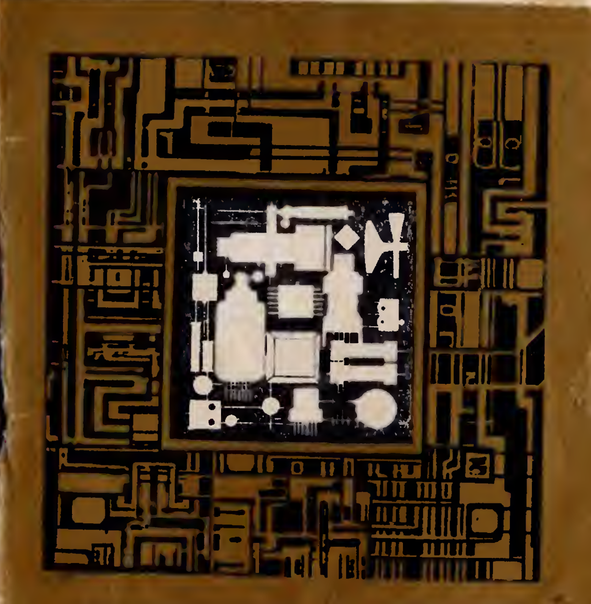
МАССОВАЯ БИБЛИОТЕКА ИНЖЕНЕРА

ЭЛЕКТРОНИКА 18

Ф. П. ПРЕСС

ФОТОЛИТОГРАФИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ В ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ И ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРОСХЕМ



МАССОВАЯ БИБЛИОТЕКА ИНЖЕНЕРА

ЭЛЕКТРОНИКА

Ф. П. Пресс

ФОТОЛИТОГРАФИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ В ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ И ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРОСХЕМ



МОСКВА «СОВЕТСКОЕ РАДИО» 1978

ББК 32.844
П73
УДК 621.382.002

Редакция литературы по электронной технике

Пресс Ф. П.

П73 Фотолитографические методы в технологии полупроводниковых приборов и интегральных микросхем.—М.: Сов. радио, 1978.— 96 с., ил.— (Массовая библиотека инженера. «Электроника»).

30 к.

Рассмотрены основные составляющие фотолитографического метода: светочувствительные материалы, собственно технология фотолитографии, применяемое современное оборудование.

Книга рассчитана на широкий круг читателей. Технологи, знакомые с фотолитографией, найдут в ней практические указания и новые сведения. Инженеров, работающих в других областях, могут заинтересовать современные возможности и перспективы развития фотолитографии.

П $\frac{30407\text{-}084}{046(01)\text{-}78}$ 57-78 ББК 32.844 6Ф0.32

Введение

Современная интегральная схема объединяет в одном кристалле кремния десятки и сотни тысяч электронных структур микроскопических размеров. Обеспечить такую высокую степень интеграции могла только технология, доведенная до совершенства. И действительно, технология, которую мы называем планарной и на принципах которой базируются разработка и производство практически всех современных полупроводниковых приборов и интегральных схем, является уникальной. Она позволяет управлять количеством примеси, исчисляемым миллиардными долями процента, регулировать толщину полупроводниковых слоев с точностью до сотых долей микрона, создавать структуры с линейными размерами менее микрона. Уровень производственной чистоты, требуемой в планарной технологии, намного выше, чем в медицине, атомной промышленности и в любой другой отрасли промышленности.

Планарная технология строится на таких методах, как эпитаксия, диффузия, ионное легирование, прецизионная сборка, и других, описываемых в книгах настоящей серии. Рассматриваемый здесь метод фотолитографии является одним из важнейших в планарной технологии. Следует подчеркнуть, что в планарной технологии многие методы можно заменить аналогичными или вообще исключить из технологического процесса. Диффузию в ряде случаев с успехом заменяет ионное легирование, технология многих планарных приборов позволяет обойтись без эпитаксиального наращивания, а разнообразие методов сборки иногда даже удивляет. И только фотолитография остается неизменным и неизбежным компонентом технического процесса при создании любого планарного прибора — от простого диода до большой интегральной схемы.

Суть фотолитографической обработки заключается в создании на поверхности полупроводниковой подложки защитного рельефа требуемой конфигурации. Для этой цели на подложку наносят слой светочувствительного и стойкого к агрессивным факторам вещества, называемо-

го фоторезистом. Затем слой фоторезиста подвергают воздействию определенной дозы излучения, чаще всего ультрафиолетового (УФ). Между источником излучения и слоем помещают фотошаблон с изображениями элементов прибора. В результате локального действия излучения свойства резиста изменяются в нужных участках. Последующая операция проявления превращает скрытое изображение в рельефное за счет удаления части слоя резиста. Образовавшийся рельеф используется как защитная маска при травлении подложки или локальном нанесении на нее каких-либо веществ, чаще всего металлов.

Таким образом, с помощью фотолитографии создается требуемая конфигурация полупроводникового прибора, его активных областей, контактов, соединений и т. д. Операции фотолитографии многократно повторяются в процессе изготовления прибора, например, при создании сложной интегральной схемы до 12 раз. На каждом этапе фотолитографии изображения точно совмещаются с полученными ранее. Если учесть, что на фотошаблоне обычно размещается несколько тысяч элементов, минимальные размеры которых могут составлять 1—2 мкм, и элементы 5—10 шаблонов должны последовательно совмещаться с точностью не хуже 1 мкм, можно представить, насколько ответственна роль фотолитографии в планарной технологии.

При оптической фотолитографии изображение создается двумя методами: проекцией изображения фотошаблона через объектив на поверхность слоя фоторезиста (проекционная фотолитография) и плотным контактным переносом (контактная фотолитография). Первый метод издавна применяется при изготовлении самих фотошаблонов. Его отличительной чертой является высокая разрешающая способность, однако она достигается на поле малого размера, поэтому оптическую проекцию сочетают с механическим перемещением пластины, покрытой эмульсией или фоторезистом. Такой оптико-механический метод приемлем при изготовлении фотошаблонов, но для фотолитографии планарных структур производительность его слишком низка. Здесь требуется одновременно создавать изображения малых размеров на больших полях — 60 мм и более. Разработка объективов для этих целей является сложной проблемой. Этим объясняется пока еще малая распространенность проекционной фотолитографии, хотя она и имеет ряд серьезных преимуществ перед контактной: в первую очередь, меньшее количество дефектов и отсутствие износа фотошаблонов. Второй метод создания изображения используется почти повсеместно, поэтому излагаемый материал относится главным образом к нему.

В планарной технологии фотолитография нашла свое наиболее яркое воплощение: без нее было бы немыслимо создание современных приборов и интегральных схем. Однако применение фотолитографических методов в микроэлектронике на этом не ограничивается. С помощью фотолитографии изготавливают тонко-и толстопленочные компоненты, печатные платы, вытравливают прецизионные детали, создают точные шкалы и трафареты для напыления. В большинстве случаев методы фотолитографии, разработанные для планарной технологии, применимы и к другим областям.

1. Негативные и позитивные фоторезисты

Фоторезисты — сложные полимерно-мономерные системы, в которых под действием излучения определенного спектрального состава протекают фотохимические процессы. Полезным результатом этих процессов является локальное изменение растворимости полимерной системы. Фоторезисты, у которых растворимость экспонированного участка уменьшается, называют негативными, фоторезисты, растворимость которых после облучения возрастает,— позитивными. После обработки экспонированного фоторезиста в составе, удаляющем растворимые участки, образуется рельефное изображение (рельеф), которое должно быть устойчивым к воздействию агрессивных факторов: кислот, щелочей и т. д. Полимерные системы, способные к образованию защитных рельефов, могут быть чувствительны не только к видимому свету, но и к другим видам излучения — рентгеновскому или к потоку электронов.

На рис. 1 показано, как образуется рельеф при использовании негативного и позитивного фоторезистов. Не останавливаясь на многочисленных светочувствительных системах (сведения о них можно найти в работах [1—4]), укажем, что процессы, лежащие в основе образования рельефного изображения делятся на три группы:

фотополимеризация и образование нерастворимых участков; наиболее типичными для системы, в которой

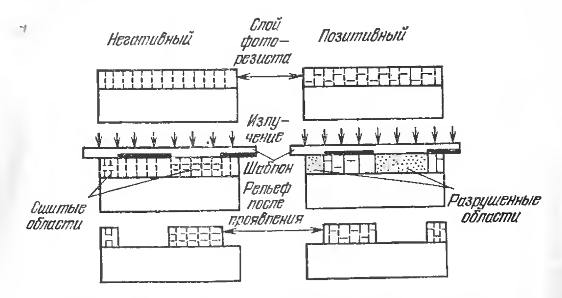


Рис. 1. Образование рельефа при использовании негативного и позитивного фоторезистов.

используется этот процесс, являются негативные фоторезисты — эфиры коричной кислоты и поливинилового спирта;

сшивание линейных полимеров радикалами, образующимися при фотолизе светочувствительных соединений. Использование каучуков с добавками светочувствительных веществ, таких, например, как бисазиды [5], дает возможность получить исключительно кислотостойкие негативные фоторезисты;

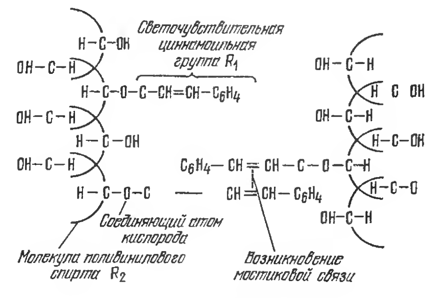


Рис. 2. Структура поливинилциннамата (ПВЦ).

фотолиз светочувствительных соединений с образованием растворимых веществ. Примером служат большинство позитивных фоторезистов, в которых фотолиз соединений, называемых нафтохинондиазидами (НХД), приводит к тому, что облученные участки становятся растворимыми в щелочных составах.

Эфиры коричной (циннамоильной) кислоты и поливинилового спирта, называемые сокращенно поливинилциннаматами (ПВЦ), имеют структуру, показанную на рис. 2. Цепочка ПВЦ насчитывает тысячи атомов и скручена в длинную спираль, от углеродной основы которой отходят циннамоильные группы. При поглощении излучения с достаточной энергией рвется двойная связь C=C в циннамоильной группе. Почему рвется именно эта связь, видно из сравнения энергии связей различных групп атомов, входящих в состав ПВЦ. Для изолированных групп C=C, находящихся вне бензольного кольца, эта энергия равна $2{,}5 \cdot 10^5$ Дж/моль, для групп C=O она составляет уже $3{,}0 \cdot 10^5$ Дж/моль и

для групп C=H достигает $4{,}0 \cdot 10^5$ Дж/моль. Возникающие при разрыве свободные связи приводят к образованию мостиков, сшивающих молекулу полимера в химически стойкую трехмерную сетку.

В негативных фоторезистах на основе каучуков светочувствительная составляющая добавляется механически в раствор полимера. Используемые для фоторезистов каучуки (изопреновый, циклокаучук и др.) содержат некоторое число двойных связей, но светочувствительность чистых каучуков недостаточна для фотолитографии. Поэтому к каучукам добавляют сенсибилизаторы (например, бисазиды), содержащие двойные связи:

Под действием излучения происходит разложение бисазидов и образуются динитрены. Продукты этого фотохимического разложения вступают в химическую реакцию с молекулами каучука, в результате чего возникает трехмерная сетка.

В позитивных фоторезистах цель фотолиза иная: она заключается в образовании растворимых соединений. Для осуществления этой задачи удобно использовать нафтохинондиазиды (НХД),

выбор которых определяет класс используемого полимера (достаточно узкий) и способ проявления изображения. Объясняется это тем, что, по существующим предположениям [1], при разрыве связи C=N и уходе молекулы азота шестичленное бензольное кольцо перестраивается в пятичленное, образуется инденкарбен, который, взаимодействуя с имеющимися в слое фоторезиста моле-

кулами воды, дает инденкарбоновую кислоту. Растворимые соли инденкарбоновой кислоты получаются только при обработке растворами со свойствами основания. В результате проявитель должен быть щелочным и полимер должен в нем растворяться. Из растворимых в щелочах полимеров по кислотостойкости и способности к образованию пленок пригодны фенолформальдегидные смолы — новолачные и резольные:

Новолак (n=4–8) *Резол (n=2–5; m=4–10)*

Полимеры вводят в фоторезист двумя способами: в составе сложного эфира со светочувствительным нафтохинондиазидом и в виде компонента раствора. Один из наиболее применяемых эфиров — эфир 1,2-нафтохинондиазид-5-сульфокислоты и новолака — имеет следующее строение:

Соединяющий атом кислорода; *Нафтохинондиазид (R_1)*; *Незамещенная часть новолака*; *Новолачная составляющая (R_2)*; n=2–5; m=0–3

Молекула нафтохинондиазида, не подвергнутая облучению, химически достаточно устойчива и препятствует взаимодействию с резистом водных растворов, как щелочных, используемых для проявления, так и кислотных, в которых осуществляют впоследствии травление. Молекулы нафтохинондиазида распределены по всему объему

слоя фоторезиста, но роль их особенно велика на поверхности, где они препятствуют разрушению неэкспонированных участков. После ухода из слоя резиста молекулы азота и образования инденкарбоновой кислоты эти свойства теряются, экспонированные участки легко смачиваются щелочным проявителем и вымываются.

Итак, мы убедились, что в фоторезисте можно выделить полимерную и светочувствительную составляющие; иногда добавляют мономерные сенсибилизаторы, изменяющие спектральную чувствительность резиста. Например, к поливинилциннаматам добавляют сенсибилизаторы, поглощающие энергию в длинноволновой части спектра, а затем отдающие ее в виде коротковолнового излучения, к которому поливинилциннамат чувствителен. Важным компонентом фоторезистов являются растворители, от которых зависят стабильность жидких растворов, характеристики нанесения и качество слоя фоторезиста, процессы высыхания слоя и т. д. Не следует считать, что каждая из составляющих выполняет только свои определенные функции. Например, от свойств полимера зависит в основном кислотостойкость фоторезиста, но при этом важную роль играет и поглощение света полимерной составляющей. В свою очередь, кислотостойкость резиста зависит от свойств светочувствительной составляющей. Так, в позитивных фоторезистах на основе нафтохинондиазидов при недостаточной очистке продукта могут содержаться остатки исходных продуктов (сульфохлорида, сульфокислоты), в результате чего количество дефектов в слое фоторезиста возрастает. Вообще, следует помнить о том, что фоторезисты — многокомпонентные мономерно-полимерные системы, в которых составляющие взаимосвязаны.

Молекулы фоторезиста представляют собой полимерные цепочки разной длины. У каучуков длина молекулы может быть равной 1—2 мкм, и в некоторых случаях это влияет на разрешающую способность фотолитографии. Цепочки полимеров имеют довольно сложную форму, продиктованную стремлением системы достичь минимума свободной энергии. Цепочка поливинилового спирта (см. рис. 2) скручена в длинную спираль. Короткие цепочки новолаков, очевидно, тоже скручены в спирали.

От основной цепи полимера отходят функциональные группы: гидроксильные, галоидные, светочувстви-

тельные, такие, как циннамоильные в негативных или нафтохинондиазидные в некоторых типах позитивных резистах. Свойства функциональных групп определяют важные характеристики резистов: светочувствительность, химическую стойкость, адгезию, эластичность пленки и др. Например, считают, что введение полярных групп повышает жесткость полимера, введение галоидных увеличивает кислотостойкость фоторезиста.

Разумным представляется характеризовать резисты следующими параметрами:

Светочувствительность — величина, обратная экспозиции, требуемой для перевода фоторезиста в растворимое или нерастворимое (в зависимости от того, позитивный или негативный резист) состояние. Чувствительностью определяется производительность процесса фотолитографии и характеристики оборудования. Например, необходимость использования нестабильных и неудобных в эксплуатации ртутных ламп вызвана тем, что максимум спектральной чувствительности резистов лежит в области ближнего УФ диапазона.

Разрешающая способность — число полос фоторезиста, разделенных промежутками такой же ширины, на 1 мм. Чаще, кстати, говорят не о разрешающей способности, а о выделяющей, т. е. способности передавать отдельные малые размеры. Как разрешающая, так и выделяющая способность зависят от многих технологических факторов. Конечная задача сводится к получению резко дифференцированной границы между исходным и экспонированным участками слоя резиста, минимально изменяющейся при проявлении и термообработке.

Стойкость к воздействию агрессивных факторов — понятие, как правило, не поддающееся общим определениям; в частном случае может означать величину, пропорциональную времени отслаивания пленки фоторезиста в используемом травителе или проникновения травителя сквозь поры пленки фоторезиста к подложке (измеряется в секундах или минутах). В последнее время стойкость пленки фоторезиста все чаще характеризуют [6] плотностью дефектов (в мм$^{-2}$), передающихся при травлении на подложку. Такой подход наиболее оправдан, поскольку отслаивание пленки — ненормальное явление, свидетельствующее о непригодности фоторезиста. Однако надо быть осторожным в оценках плотности дефектов на подложке, поскольку они могут возникать и независимо от фотолитографии. Обязательным условием обеспечения стойкости является получение однородной бездефектной пленки фоторезиста с высокой адгезией к подложке и устойчивой к воздействию составов, применяемых для проявления и травления. Для позитивных фоторезистов, в частности, указывают важный параметр: устойчивость к воздействию стандартного проявителя (в минутах). Она должна быть по крайней мере на порядок выше времени проявления.

Стабильность эксплуатационных свойств фоторезистов во времени выражается сроком службы при определенных условиях хранения и использования. Обеспечение этого качества — одна из важнейших проблем. Для контроля стабильности фотохимических свойств позитивных резистов в какой-то мере можно использовать измерение оптической плотности слоя известной толщины [6]. Опти-

ческая плотность пропорциональна концентрации светочувствительных молекул, и, периодически ее измеряя, можно судить, не изменились ли характеристики фоторезиста.

Помимо характеристик важно знать и некоторые основные зависимости, описывающие поведение фоторезистов. К ним относятся спектры поглощения и характеристические кривые.

Спектры поглощения негативных резистов показаны на рис. 3. У резистов на основе каучуков с бисазидами наблюдается один отчетливый максимум на длине волны около 370 нм. Фоторезисты на основе ПВЦ имеют два максимума поглощения: один, как и у сенсибилизированных каучуков, связан с поглощением сенсибилизатора (360—370 нм), другой отражает поглощение самого ПВЦ (280 нм).

Рис. 3. Спектр поглощения негативных резистов:

1 — каучук с бисазидом; *2* — сенсибилизированный ПВЦ; *3* — экспонированный резист.

Позитивные фоторезисты также имеют два максимума поглощения (рис. 4) на длинах волн 350 и 400 нм. В отличие от ПВЦ оба максимума связаны с поглощением одной и той же молекулы НХД. Спектры поглощения определяют тип источников экспонирования, помогают выбрать материалы для экранирования пластин с фоторезистом от засвечивания.

При экспонировании слоя резиста вид спектров поглощения меняется (рис. 3, 4); эти изменения отражают процессы разрушения светочувствительных молекул или сшивания полимерных цепей.

Полезным «выходом» реакции поглощения является изменение толщины слоя фоторезиста после проявления. Для оценки этого процесса снимают характеристические кривые. Приведенная на рис. 5 кривая *1* показывает, как увеличивается толщина слоя негативного резиста на экспонированных участках по мере роста экспозиции. Из этой кривой можно найти важные параметры резиста: чувствительность $S = 1/H_2$, где H_2 — экспозиция, при которой слой полностью задублен (или разрушен в случае позитивного резиста); контрастность $\gamma = (h_2 - h_1)/(H_2 - H_1)$ и фотографическую широту $L = H_2 - H_1$, где H_1 — экспозиция, при которой начинается сшивание или разрушение слоя.

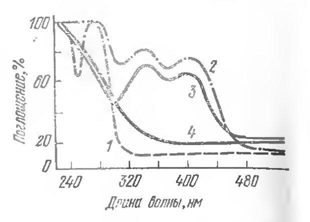


Рис. 4. Спектр поглощения позитивных резистов:

1 — новолачная смола № 18 (0,73 мкм); *2* — фоторезист на основе НХД № 7 (1,7 мкм); *3* — НХД № 7 (0,17 мкм) до экспонирования; *4* — то же после экспонирования.

Для позитивного резиста можно снять аналогичную характеристическую кривую (кривая *2* на рис. 5), но более полную информацию о поведении позитивных резистов дает зависимость скорости проявления от экспозиции, которую тоже называют характеристической [7]. Это объясняется тем, что при работе с позитивными резистами весьма важно, чтобы слой находился в щелочном проявителе минимальное время (при этом количество дефектов минимально), т. е. следует определить экспозицию, обеспечивающую максимальную скорость проявления.

В настоящее время в СССР и за рубежом разработано много различных фоторезистов. В США, например, выпускаются и применяются в равной мере негативные и позитивные резисты, разрешающая способность которых близка. В отечественной практике в основном используются позитивные фоторезисты, так как выпускаемые негативные резисты на основе поливинилциннамата и каучука не обеспечивают требуемого качества фотолитографии. В частности, они не позволяют получить такую же разрешающую способность, как позитивные.

Рис. 5. Характеристические кривые для негативного (*1*) и позитивного (*2*) резистов.

Часто говорят о том, что негативные фоторезисты имеют меньшую разрешающую способность из-за большой длины молекул. Это может относиться в какой-то мере только к резистам на основе каучуков с большой молекулярной массой; в основном же низкая разрешающая способность негативных резистов определяется условиями экспонирования и проявления. При экспонировании негативных резистов, в отличие от позитивных, чаще возникает по краю рисунка характерный ореол, вызванный отражением света от подложки. В проявителе пленка негативного резиста разбухает, что приводит к искажению размеров. Процесс растворения незадубленной части слоя негативного резиста подчиняется диффузионным ограничениям: по этой причине трудно проявить элементы малых размеров. Тем не менее, судя по литературным данным, на негативных резистах (например, фирмы «Кодак») можно уверенно получать минимальные размеры около 1 мкм, так что проблема заключается в разработке и выпуске качественных негативных резистов. При выборе негативного или позитивного резиста большое значение имеют не только разрешающая способность, но и кислото- или щелочестойкость. Позитивные резисты не выдерживают щелочных травителей, хотя известны попытки [8] создать щелочестойкий резист на основе О-нафтохинондиазидов путем добавления эпоксидных групп. Негативные резисты устойчивы к воздействию кислот и щелочей, особенно резисты на основе каучуков.

Отечественной промышленностью серийно выпускаются позитивные (ФП-383, ФП-РН-7) и негативные (ФН-5ТК, ФН-11, ФН-11К, ФН-4ТВ) фоторезисты [28], а также светочувствительные продукты, являющиеся основой позитивных фоторезистов, такие, как № 30, 27, 11 (продукты № 83 и 7, входящие в резисты ФП-383 и ФП-РН-7,

отдельно не выпускаются). Все эти продукты представляют собой сложные эфиры нафтохинондиазида и какой-либо фенолформальдегидной смолы, например новолака. В молекулах этих полимеров водород может быть замещен галоидом — бромом, хлором, йодом. Введение подобных функциональных групп, как уже отмечалось выше, позволяет изменять свойства резистов: способность к растворению, адгезию к определенным подложкам, кислотостойкость.

Светочувствительность различных продуктов, как показано в работе [6], примерно одинакова. При этом за меру чувствительности принимали константу скорости фотолиза, определяемую по изменению оптической плотности по мере экспонирования и разрушения молекул НХД. Если же при определении светочувствительности в качестве критерия выбрана экспозиция, при которой достигается максимальная скорость проявления, то прослеживается зависимость светочувствительности от вида галоида, замещающего водород в полимерной молекуле сложного эфира. В работе [9], например, отмечается, что время достижения максимальной скорости проявления заметно снижается в ряду водород — хлор — бром — йод. Так, для резиста на основе продукта № 85, в котором водород не замещен, оно составляло 50 с (толщина слоя 1,5±0,2 мкм, освещенность 40 тыс. лк, лампа ДРШ-250), а для резиста на основе продукта № 7 (заместитель йод) 7,5 с.

Строение полимерной молекулы заметнее влияет на другие свойства резистов, чем на светочувствительность: способность растворяться в органических растворителях, адгезию, скорость термолиза. Это относится как к полимерной составляющей эфира, так и к смоле, добавляемой к эфиру при приготовлении резистов. Например, продукт № 27 обладает наиболее высокой растворимостью в органических растворителях; вязкость резистов на основе этого продукта в 5—6 раз превышает вязкость резиста ФП-383. Можно предположить, что это свойство обусловлено пространственной структурой полимерной молекулы, входящей в состав эфира. Плохая растворимость некоторых продуктов, таких как № 83, в широко применяемом диоксане приводит к тому, что в слое резиста ФП-383 возникают хорошо известные технологам «лучи». Так называют возникающие при центрифугировании неровности, которые имеют вид лучей, радиально расходящихся от центра пластины. Луч представляет участок слоя, отличающийся как по толщине (в соседней впадине толщина может быть меньше на 60—90 нм), так и по коэффициенту преломления [10]. Появление лучей вызывает локальное изменение размеров, так как условия экспонирования лучей на выступе и впадине различны. Возникновение лучей недопустимо при проекционной фотолитографии, где освещенность мала и ее колебания приводят к большой неравномерности изображения. В слое фоторезиста на основе продукта № 27 лучей не наблюдается, а высокая растворимость этого продукта позволяет работать со слоями толщиной до 3—4 мкм.

Наилучшей адгезией обладает фоторезист ФП-РН-7. Очевидно, это свойство также связано с полимерной составляющей: в состав ФП-РН-7 входит не только новолачная, но и резольная смола (как добавка в раствор). Резольные смолы достаточно хорошо себя зарекомендовали в качестве полимерных добавок к резистам. В работе [11] проведено исследование ряда резистов с добавками новолачной или резольной смол. Показано, что резист ФП-РН-7 и резисты на основе продуктов № 27, 30, 83 в сочетании с резольной

смолой обеспечивают лучшее качество фотолитографии на любых подложках, применяемых в планарной технологии (окисел, фосфоросиликатное стекло, алюминий, хром), чем готовый резист ФП-383 или резист на основе продукта № 30 в смеси с новолаком. Здесь же, однако, отмечается, что резисты на основе продукта № 27 показывают примерно одинаковые хорошие результаты при использовании как резольной, так и новолачной смол; следует признать, что вопрос о влиянии структуры полимера достаточно сложен и до конца не выяснен.

Об адгезии резиста к подложке можно судить по углу смачивания им поверхности подложки. В работах [6, 61] исследованы процессы смачивания резистов и их составляющих: светочувствительных продуктов, смол и растворителей. Минимальные углы смачивания (менее 1°) на фосфоросиликатных, боросиликатных стеклах и окисле показал продукт № 7, на алюминии — продукт № 27. Растворы новолачной и резольной смол плохо смачивают подложки (углы смачивания 3—8°), на основании чего сделан вывод о том, что адгезионные свойства в большой степени обеспечиваются взаимодействием с подложкой светочувствительного продукта. Весьма важен также выбор растворителя. Оптимальное сочетание высокой растворяющей способности и хорошего смачивания позволяет получить метилэтилкетон. Широко используемый в практике изготовления резистов диметилформамид значительно уступает ему по этим показателям. Приведенные сведения говорят о том, что свойства всех составляющих резистов тесно взаимосвязаны, а вопрос влияния их на качество фотолитографии изучен не полностью.

Практические рекомендации по выбору позитивного резиста могут быть сформулированы следующим образом. Из серийно выпускаемых фоторезистов разумно использовать ФП-383 для фотолитографии по термическому окислу и алюминию; для фотолитографии по примесно-силикатным стеклам больше подходит фоторезист ФП-РН-7. К сожалению, качество этого резиста изменяется от партии к партии. Если возможно применение несерийных фоторезистов, предпочтение отдают резисту на основе продукта № 27 в сочетании с новолачной или резольной смолами. При работе с резистами на основе продукта № 27 следует помнить о его высокой скорости термолиза. В работе [6] показано, что при температуре 100°С максимально допустимое время термообработки для резиста ФП-27 составляет 9 мин, а для резиста ФП-383 — 60 мин. Если это время недостаточно для удаления растворителя из слоя резиста ФП-27, следует снижать температуру первой сушки.

В качестве примера приведем технические условия (ТУ) на позитивные фоторезисты. В них оговорена разрешающая способность для определенной толщины слоя: не менее 500 линий/мм при толщине 0,7—0,8 мкм. Стойкость к воздействию агрессивных факторов оценивается плотностью дефектов для толщины слоя фоторезиста 0,7—0,8 мкм. Фоторезист наносят на окисленную пластину кремния и проводят все операции фотолитографии, за исключением экспонирования. После этого определяют плотность протравленных в окисле дефектов методом электрографии [12] или же по количеству к. з. на подложку площадок алюминия, напыленных поверх окисла. Для фоторезиста ФП-РН-7 плотность дефектов, определенных электрографически, не должна превышать 0,3 дефект/мм². Это значение указано для резиста, отфильтрованного через бумажный

фильтр; применяя мембранные фильтры с диаметром пор 1,0—0,25 мкм, можно обеспечить плотность дефектов около 0,01 дефект/мм². При проверке маскирующих свойств слоя резиста методом к. з. площадок напыляют (после травления окисла и удаления резиста) слой алюминия толщиной 0,3 мкм через маски с 480 отверстиями диаметром 300 мкм и измеряют процент площадок, показывающих к. з. Для этого метода норма дефектности в ТУ составляет 3%. В ТУ приводятся также данные для жидкого фоторезиста: содержание сухого остатка, плотность раствора, показатель преломления. Интересно отметить, что в ТУ на резисты, выпускаемые в США, включены показатель преломления для жидкого и сухого резистов, отличающиеся по величине. Для потребителя резистов важно знать коэффициент преломления высушенного слоя фоторезиста, по значению которого можно судить о степени разрушения светочувствительных групп [10]. Так, у неэкспонированного слоя резиста ФП-РН-7 показатель преломления $n=1,66\pm0,02$ (у жидкого резиста $n=1,439\pm0,05$), а у полностью экспонированного слоя $n=1,58\pm0,03$, что близко к показателю преломления слоя резольно-новолачной смолы, входящей в резист в качестве полимерной основы. Указано в ТУ и поверхностное натяжение раствора фоторезиста при 20±0,5°С. Этот показатель важно контролировать, так как от величины поверхностного натяжения резиста зависит, будет ли он хорошо смачивать подложку.

Для высушенного слоя резиста регламентируется внешний вид: поверхность слоя должна быть ровной, в слое не должны наблюдаться включения при рассматривании под микроскопом типа МИИ-4 (300—400 кратное увеличение) с зеленым светофильтром.

В ТУ на особо чистые фоторезисты ряд зарубежных фирм регламентирует содержание вредных примесей — ионов щелочных металлов и металлов, ответственных за возникновение центров генерации-рекомбинации. Так, в резистах марки Microresist-707 [13] общее содержание ионов металлов не превышает 10^{-5}, а ионов калия, натрия, лития, олова и золота составляет $3\cdot10^{-6}$ (для каждого в отдельности). Кроме того, указываются предельное содержание воды (менее 0,2%) и допустимая мутность раствора (менее 5%).

Выпускаемый серийно негативный фоторезист ФН-5ТК изготовлен на основе поливинилциннамата с добавлением сенсибилизатора. По своей природе этот резист близок к известному фоторезисту KPR фирмы «Кодак». Однако этой фирмой фоторезисты поставляются в комплекте со специализированными разбавителем и проявителем, и этим во многом обеспечивается высокое качество фотолитографии. Фоторезист ФН-11К изготовлен на основе каучука, сенсибилизированного азидосодержащим соединением. Негативные фоторезисты применяют обычно в тех случаях, когда позитивные непригодны, например при травлении в щелочах или же для защиты толстым слоем при электролитическом или химическом нанесении металлов. Разработан также и выпускается негативный фоторезист ФН-4ТВ, специально предназначенный для нанесения толстых слоев валковым методом. Исследованию свойств негативных фоторезистов, в частности процессов фотолиза и термолиза, посвящена работа [14].

В последние годы быстрыми темпами разрабатываются и производятся резисты для электронно-лучевой литографии [15]. Подобно фоторезистам электронорезисты делятся на негативные, в которых над действием электронного пучка полимер сшивается, и позитивные, в которых экспонированные участки деструктируют. Чувствительность электронорезистов определяется как минимальный электрический заряд на единицу площади слоя резиста, требуемый для полного сшивания или разрушения экспонированного участка; единица измерения чувствительности Кл/см².

Негативными электронорезистами могут быть полимеры, у которых облучение электронами вызывает процессы поперечного сшивания: полибутадиент, полиизопрен, поливинилхлорид, полистирол, полиакриловая кислота и ее эфиры, полифенилсилоксан, натуральный каучук и др. Из этих полимеров подходят те, у которых температура стеклования выше комнатной и, естественно, наиболее кислото- и щелочестойкие. При разработке негативных электронорезистов имеет значение распределение по молекулярным массам. Средняя молекулярная масса должна быть возможно большой, поскольку произведение ее на чувствительность есть величина постоянная [16]. Само распределение должно лежать в очень узком диапазоне масс, так как присутствие больших молекул вызывает снижение разрешающей способности, а у молекул с малой молекулярной массой тенденция к сшиванию низка, их легко растворить при проявлении, в результате чего могут появиться сквозные отверстия.

Из описанных в литературе негативных электронорезистов заслуживают внимание следующие:

1. Электронорезисты с высокой чувствительностью, включающие эпоксидированные полиизопрен и полибутадиен, а также сополимеры эфиров метакриловой и акриловой кислот [17]. У эпоксидированных резистов чувствительность достигает $(2-5)\cdot10^{-8}$ Кл/см² при толщине слоя 0,3—1,0 мкм. Это на 3—4 порядка выше, чем у позитивных электронорезистов (почти у всех негативных электронорезистов чувствительность выше, чем у позитивных). Чувствительность сополимеров несколько ниже, но также высока: 10^{-7}—10^{-6} Кл/см² при толщине слоя 0,08—0,12 мкм. На слоях этих электронорезистов с помощью электронного сканирующего микроскопа были получены линии шириной 0,5—0,7 мкм на расстоянии 2 мкм друг от друга. Проявителем для сополимерных резистов является трихлорэтилен, разбавителем — этиловый эфир уксусной кислоты.

2. Электронорезист с высокой кислото- и щелочестойкостью — поливинилхлорид. Чувствительность его при толщине слоя 0,5 мкм составляет $3\cdot10^{-5}$ Кл/см², электронорезист обеспечивает получение линий довольно хорошего качества с шириной наклонной части линии около 1 мкм.

3. Значительный интерес представляет группа полисилоксановых электронорезистов. В этих полимерах под воздействием электронного облучения или последующей термообработки органические соединения почти полностью разрушаются и остающийся слой обладает свойствами аморфной двуокиси кремния. С помощью полиметилциклосилоксана [18] была осуществлена окисловая маскировка при диффузии и изготовлены биполярные транзисторы с хорошими характеристиками. Слой резиста наносили на пластину кремния, экспонировали, проявляли в ацетоне несколько секунд, прогревали в атмосфере азота при температуре 1250°С, после чего проводили диффузию. Маску легко удаляли в плавиковой кислоте, и процедуру повторяли. Резист также с успехом использовали в качестве пассивирующего покрытия; в этом случае проявленный

рельеф подвергали 10-мин обработке во влажном кислороде при 680°С с последующим уплотнением в сухом азоте при 200°С в течение 30 мин. Чувствительность полиметилциклосилоксана невысока: $1{,}5\cdot10^{-4}$ Кл/см² при толщине слоя 0,5 мкм. Разрешающая способность резиста в работе [18] не оценивалась, о ней можно судить по тому, что изготовленные транзисторы имели ширину эмиттера 5 мкм.

4. Негативные светочувствительные фоторезисты с успехом могут использоваться и для электронной литографии. Чувствительность фоторезиста KTFR составляет $3\cdot10^{-6}$ Кл/см² при толщине слоя 0,15—0,25 мкм, на нем получают линии шириной 2 мкм с неровностью края 0,05 мкм.

Позитивные электронорезисты создаются на основе полимеров, в которых под действием электронного излучения происходит деструкция с образованием продуктов меньшей молекулярной массы, например: полиметилметакрилат, полиметилстирол, полиизобутилен, целлюлоза и ее производные и др. При выборе полимера учитывают его кислото- и щелочестойкость, адгезию к подложке, температуру стеклования. Распределение по молекулярным массам при выборе позитивных электронорезистов имеет меньшее значение, чем при выборе негативных, но при одном важном условии: распределения по массам исходного и облученного полимера должны в достаточной степени отличаться.

Рассмотрим основные типы позитивных электронорезистов.

1. Наиболее широко в производстве полупроводниковых приборов и интегральных схем применяется полиметилметакрилат (ПММА). Он очень стабилен во времени, нечувствителен к УФ излучению, стоек к воздействию большинства кислот (кроме соляной). Чувствительность ПММА составляет $5\cdot10^{-5}$ Кл/см² при толщине слоя 0,5 мкм. Разрешающая способность, которую обеспечивает этот электронорезист, является наибольшей по сравнению с любыми другими: были получены линии шириной около 0,1 мкм. С использованием ПММА изготовлены, например, транзисторы с шириной полосок металлизации 0,5 мкм. Проявителем для ПММА служат 95%-ный этиловый спирт, смесь метилэтилкетона с изопропиловым спиртом (30 : 70) или метилизобутилкетона с изопропиловым спиртом (25 : 75).

Получить ПММА можно полимеризацией мономера или же растворением 5%-ной метакрилатной смолы в сероуглероде [16]. Средняя молекулярная масса исходного ПММА составляет 100 тыс., после облучения она становится равной примерно 10 тыс. Желательно, чтобы распределение по молекулярным массам исходного ПММА было возможно более узким.

2. Позитивные светочувствительные фоторезисты AZ-1350 обеспечивают при электронном экспонировании примерно те же результаты, что и при оптической фотолитографии. Ширина линий, полученных, например, облучением резиста AZ-1350 составляет 1 мкм при толщине слоя 0,3 мкм. Чувствительность позитивных фоторезистов в среднем на порядок ниже, чем негативных; для AZ-1350 она составляет $8\cdot10^{-5}$ Кл/см² при толщине слоя 0,36 мкм.

3. Эффективную маскировку при ионном травлении позволяет осуществить электронорезист полистирол сульфон. Позитивные электронорезисты хуже противостоят воздействию ионов, чем негативные, но превосходят последние по разрешающей способности. По этой причине представляет интерес разработка [19] позитивного

резиста (полистирол сульфона) с весьма малой скоростью разрушения под воздействием ионов: около 0,5 нм/с. Резист получают сополимеризацией стирола с SO_2; растворителем служит метоксиэтилацетат, проявителем — смесь 60%-ного диоксана и 40%-ного изопропилового спирта. Чувствительность резиста составляет 10^{-5} Кл/см² при толщине слоя 0,3 мкм.

2. Методы изготовления и характеристики фотошаблонов

Для получения комплекта фотошаблонов — набора стекол с совмещающимися множественными изображениями, имеющими малые размеры элементов и большую общую площадь — применяются три метода (или их сочетания): *оптико-механический*, объединяющий высокоразрешающую проекцию малой площади с последовательным мультиплицированием и основанный на применении фотоповторителей; *сканирования*, в котором используются модулируемые по длительности или амплитуде световые или электронные пучки; *растровый*, осуществляемый с помощью линзовых, зеркальных или голографических растровых устройств.

В настоящее время оптико-механический метод наиболее распространен. Мы не будем останавливаться на нем подробно, так как он достаточно полно описан в литературе [20], а рассмотрим общую схему процесса изготовления комплекта фотошаблонов и современное оборудование для его осуществления.

При организации процесса целесообразно выделить два вида информации: основную — о топологии структур и дополнительную (или вторичную) — о типе шаблонов, мультиплицировании, порядке контроля и т. д. Схема изготовления фотошаблонов приводится на рис. 6.

Сначала разрабатывается техническое задание на комплект фотошаблонов. Формируется основная и дополнительная информация, причем последняя играет весьма важную роль; к ней относятся:

1. Указания о типе шаблонов — с прозрачными элементами на темном поле или с темными элементами на светлом. Такое деление имеет значение как для уменьшения и мультиплицирования (поскольку от типа шаблона будут зависеть условия экспонирования), так и для контроля шаблонов. При контроле важно знать тип

фотошаблона, так как им определяется характер опасных дефектов. Например, фотошаблон для создания базы транзистора представляет прозрачные окна на темном поле и опасными дефектами являются непрозрачные островки хрома.

2. Информация о мультиплицировании. Помимо количества мультиплицированных структур обозначаются пропуски структур, облегчающие совмещение и контроль, а также любые другие непериодические изображения (номера, тестовые структуры и т. д.).

3. Контрольная информация, которая делится на два вида. Один вид (задающий) указывает, каким образом выполняются отметки совмещения и обязательные для сложных приборов тестовые структуры, позволяющие проверять разрешающую способность фотолитографии, технологические параметры (поверхностное сопротивление, дефекты окисла) и электрические параметры прибо-

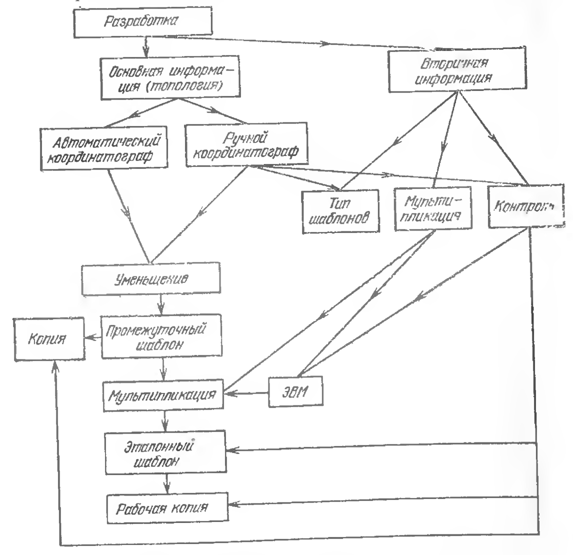


Рис. 6. Схема изготовления шаблонов.

ра. Ко второму виду относятся указания о методике и критериях контроля характеристик изготовленных шаблонов: размеров, совмещаемости, критических областей, дефектов и т. д.

Основная и дополнительная информация используется в процессе изготовления как контрольно-конструкторская документация или же, если применяется ЭВМ, как программа управления.

Следующей стадией является изготовление оригиналов, которое осуществляется в основном с помощью ручных и автоматических координатографов. Примером координатографа с программным управлением может служить отечественная модель ЭМ-703 [20]. Точность координатографа ЭМ-703 составляет ±50 мкм, максимальная скорость движения резца — 100 мм/с, ввод информации — фотоэлектрический с бумажной перфоленты в двоично-десятичном коде. Стремление повысить скорость изготовления сложных оригиналов привело к тому, что обычные методы вырезки и скрайбирования начинают заменяться фотографическими. Примером реализации фотографического метода служит автоматический координатограф, в котором пучок света рисует изображение на фотопластине или лазерный пучок выжигает изображение в тонкопленочном покрытии.

Дальнейшим этапом должно явиться изготовление уменьшенного промежуточного шаблона с помощью редукционной камеры. однако развитие методов изготовления шаблонов фактически стирает различия между стадиями изготовления оригиналов и промежуточных фотошаблонов, поскольку может быть получено с достаточной точностью сразу промежуточное изображение.

Существуют два фотографических метода создания промежуточного изображения: *фотонаборный метод* и *метод сканирования* модулируемым пучком света. Фотонаборный генератор изображений, примером которого может служить отечественная модель ЭМ-519 [20], содержит следующие основные узлы:

— источник освещения с лампой-вспышкой или ртутной лампой сверхвысокого давления;

— наборная диафрагма изменяемой конфигурации, например в виде сходящихся лепестков, образующих прямоугольные отверстия различного размера (до 65 тыс. вариантов), диафрагма может также поворачиваться на 90° (с дискретным шагом, например, 0,2°) относительно центра;

— высококачественный объектив, проецирующий с уменьшением обычно в 10 раз отверстие диафрагмы на фотопластинку;

— координатный стол, перемещающийся по двум осям с высокой точностью (порядка ±0,5 мкм); перемещение стола осуществляется серводвигателями и управляется лазерными интерферометрами;

— управляющая ЭВМ, в которую вводится программа последовательной работы генератора, содержащая следующие основные операции: установление длины, ширины и угла поворота диафрагмы; установление координаты одной из точек элемента изображения; перемещение по осям и поворот стола; экспонирование.

Для конструирования оригиналов комплекта из 8 сложных фотошаблонов для интегральной схемы при методе фотонабора требуется 2 ч; для получения промежуточных шаблонов на фотонаборном генераторе — еще 1 ч. При использовании обычного метода, т. е. с помощью редукционной камеры, эта же операция требует около 100 ч.

Еще бóльшей производительности позволяет достичь генератор изображений со сканирующим лучом. В одном из возможных вариантов такого генератора луч гелий-неонового лазера модулируется по определенной программе, затем попадает на вращающееся десятигранное зеркало и фокусируется в плоскости фотопластинки. Грань зеркала разворачивает световое пятно в линию, происходит сдвиг стола с фотопластинкой и следующая грань создает новую линию, перекрывающуюся частично с первой. Конфигурация получающегося изображения определяется длительностью световых импульсов, числом оборотов зеркала и скоростью перемещения стола. С помощью такого генератора промежуточный фотошаблон средней сложности создается за 10—12 мин вместо 24 ч, требуемых при работе с автоматическим координатографом.

В настоящее время использование фотонаборных генераторов шире, чем генераторов со сканирующим лучом. Следует отметить, что за последние годы разработка больших и сверхбольших интегральных схем и внедрение методов машинного проектирования существенно изменили начальные этапы технологического процесса изготовления фотошаблонов. Техническое задание на фотошаблон для большой интегральной схемы уже

не имеет смысла выражать в виде топологического чертежа: слишком сложно и непродуктивно было бы подготовить такой чертеж. Исходным техническим документом при изготовлении фотошаблонов сложных интегральных схем становится принципиальная электрическая схема, которую с помощью ЭВМ и набора алгоритмов преобразуют в топологическую. Развитая система машинного проектирования позволяет в качестве исходной использовать функциональную схему устройства, по которой образуются логическая, электрическая и топологическая схемы. Информация о топологии, рассчитанной ЭВМ, вводится непосредственно в генератор изображения.

Вернемся, однако, к широко используемому традиционному методу, при котором промежуточный негатив изготовляют с помощью редукционной камеры. На этом этапе приходится решать задачу получения высококачественного изображения на большом поле. В редукционных камерах поэтому применяют сложные многолинзовые планахроматы с высоким разрешением (около 400 линий/мм) и большим рабочим полем (до 90 мм у лучших объективов); примером служат объективы фирмы Opton серии S-Planar с фокусным расстоянием 195 мм.

Следующий этап — мультиплицирование — осуществляется с помощью фотоповторителей, представляющих сочетание высокоразрешающей редукционной камеры (или нескольких) с точным координатным столом. Для мультиплицирования также требуются объективы очень высокого качества, но с несколько отличающимися характеристиками. Для достижения предельно высокой разрешающей способности (более 1000 линий/мм) рабочее поле объектива приходится уменьшать; обычно его диаметр не превышает 4—8 мм.

Точность перемещения координатного стола современного фотоповторителя исключительно высока: до ±0,2 мкм у однопозиционных повторителей и около 2 мкм у многопозиционных. Для работы фотоповторителя необходима жесткая температурная стабилизация: колебания температуры в помещении не должны превышать ±0,5° С. Характеристики трех современных фотоповторителей приводятся в табл. 1.

Мы рассмотрели оптико-механический метод и метод сканирования. Следует кратко упомянуть об электрон-

Таблица 1

Сравнительные характеристики современных фотоповторителей

Характеристики	ЭМ-522, СССР	ANR-4, ГДР	DW-1680, США
Число позиций	1	9	6
Масштаб уменьшения	10×	15×; 10×; 6×	10×
Разрешение (минимальный размер), мкм	1,5	1,1; 2; 5	1,5
Точность позиционирования, мкм	±0,2	2	2
Воспроизводимость позиционирования, мкм	±0,2	±0,15	±0,25
Максимальное перемещение стола, мм	80	54	100
Максимальное поле объектива, мм	8	2,85; 4,25; 7,25	8
Способ фокусировки	Автоматический	Ручной	

но-лучевом методе изготовления фотошаблонов, в котором используется принцип сканирования. Применяя установку JEBX-2B (Япония) и ЭВМ, можно получить хромированный фотошаблон с минимальным размером 1 мкм на поле площадью 50×50 мм. Этот размер не является предельным и, очевидно, достичь субмикронного диапазона размеров с помощью электронного экспонирования практически легче, чем с помощью оптических методов (не говоря о том, что пределом последних является 0,15—0,2 мкм).

Растровые методы изготовления шаблонов не нашли до настоящего времени широкого применения, однако некоторые разработки заслуживают внимания. Например, растровая камера с мозаично-зеркальной системой (в одной из конструкций 7×7 зеркал с размером сторон 50 мм, расстоянием между центрами 55 мм) позволяет получать размноженные изображения с минимальными размерами 3—4 мкм. Описана голографическая система мультиплицирования, в которой используется голограмма с записью точечного растра. Разрешающая способность полученных изображений пока невелика (около 100 линий/мм), но, используя лучшие объективы и более качественные голограммы, т. е. записанные на очень плоских стеклах и высококачественных фотоэмульсиях, ее можно значительно повысить.

Независимо от используемого метода получение высококачественных фотошаблонов во многом определяется технологическим уровнем и характеристиками фоточувствительных материалов, фотопластинок или фотоплат (особоплоских стекол, покрытых фоторезистом). Фотопластинки и фотоплаты должны отвечать следующим требованиям:

— высокая разрешающая способность: наивысшую разрешающую способность обеспечивают фоторезисты (более 2500 линий/мм);

— высокая контрастность: наиболее контрастны фоторезисты и специальные фотоэмульсии на пластинках «Кодак-HR» и отечественных ВР;

— достаточно высокая светочувствительность: низкая светочувствительность фоторезистов (на 2—3 порядка ниже, чем у фотоэмульсий) затрудняет использование фотоплат в повторителях с непрерывным движением стола;

— точная фиксация плоскости изображения: изображения с микронными и субмикронными размерами получают с помощью объективов, глубина резкости которых чрезвычайно мала (2—3 мкм); толщина чувствительного слоя и ее колебание по полю должны быть поэтому возможно меньшими, а плоскостность стеклянной подложки — максимально высокой. У лучших фотопластинок толщина эмульсии составляет 3—7 мкм, толщина слоев фоторезистов много меньше — порядка доли микрона. Плоскостность фотопластинок фирмы «Кодак» лежит в пределах от 10 до 0,2 мкм/см.

— минимальное число дефектов (под дефектами понимаются проколы, включения и т. д.).

Обрабатывать фотоматериалы необходимо особо чистыми реактивами в производственных помещениях высшего класса. В частности, рекомендуется применять ультразвуковое воздействие при отмывках фотопластинок и постоянную фильтрацию всех растворов, включая деионизованную воду, от частиц размерами более 0,5 мкм. Обработка проводится в скафандрах с ламинарным потоком. Требования к регулировке температуры среды могут быть определены из следующих соображений: коэффициент линейного расширения стекол $(8—10)\cdot 10^{-6}$, размер подложки — 50—70 мм, следовательно, колебания температуры ±1°С вызовут изменение расстояния между крайними структурами на 0,4—0,6 мкм.

В качестве примера можно привести данные о режимах обработки фотопластинок [21]: точность поддержания экспозиции ±0,2 с (в интервале от 4 до 6 с); концентрации растворов ±2%, времени проведения химических процессов ±2 с, температуры растворов ±0,15°С, температуры при сушке ±5°С.

Следует отдельно рассмотреть важный вопрос изготовления металлизированных копий фотошаблонов. В качестве подложек для копий используются пластинки размером примерно 70×70 мм² и толщиной от 2 до 10 мм из оптического стекла марки К-8 (это стекло относится к классу кронов). Применение обычного оконного стекла нежелательно, поскольку оно в 2,5 раза менее устойчиво к стиранию и царапанию, более подвержено образованию поверхностных налетов, содержит большое количество дефектов (заметим, однако, что в США оконное стекло широко применяется для изготовления шаблонов из-за его низкой стоимости).

Для очистки поверхности стекла перед нанесением металлической пленки применяют выдержку в хромовой смеси в течение 24 ч

и обработку в смеси аммиака с перекисью водорода. Непосредственно перед напылением хрома проводят термообработку при 400°С или обработку тлеющим разрядом. Напыление хрома осуществляется из вольфрамовых испарителей в вакууме $6{,}6\cdot10^{-3}$ Па со скоростью 0,5—0,8 нм/с. Применяется хром марки ХО в виде чешуек размером 3×3 мм. Чешуйки травятся в соляной кислоте, а перед напылением отжигаются при температуре, близкой к температуре испарения. Оптимальная температура подложки при напылении 100°С; при меньшей температуре растет плотность дефектов в пленке, уменьшаются адгезия и прочность к стиранию. Повышение температуры приводит к тому, что структура пленок становится крупнозернистой, а количество дефектов вновь возрастает.

Напыление хрома может проводиться в один или два (иногда даже в три) приема, поскольку плотность проколов у многослойных покрытий снижается. Разгерметизация и дополнительные термообработки после каждого напыления вызывают окисление поверхности хрома, так что многослойные пленки травятся послойно, причем верхний слой стравливается быстрее. После напыления подложку с хромом отжигают при температуре около 400°С для увеличения адгезии; при этом следует контролировать плотность проколов, которая может увеличиваться. В пленке хрома содержатся хаотически расположенные проколы, распределение которых по размерам хорошо описывается нормальным законом. Средний размер прокола составляет 0,5—1 мкм. Плотность проколов зависит от обработки поверхности стекла, режимов напыления и толщины пленки хрома.

При фотолитографии по хрому следует обращать особое внимание на качество проведения всех операций. Метод нанесения фоторезиста должен обеспечивать малое количество дефектов слоя. В работе [22] отмечается, что бездефектные покрытия достигаются методом окунания стеклянных подложек в фоторезист. Толщину слоя следует подбирать для каждого класса фотошаблонов так, чтобы при минимальном числе дефектов еще воспроизводились минимальные размеры изображения. В работе [22] рекомендуется готовый фотошаблон обрабатывать при 425°С на воздухе в течение 2 ч для создания на поверхности хрома тонкого слоя, поглощающего в области длин волн 365 нм. На этих длинах волн некоторые фоторезисты (например, на основе поливинилциннамата) поглощают мало энергии, так что ультрафиолетовое излучение проходит сквозь слой резиста и окисла, отражается от кремния, попадает на хром и снова отражается. При создании на хроме поглощающей пленки вредный эффект многократного отражения уменьшается.

Итак, мы кратко рассмотрели процесс изготовления фотошаблонов и убедились, что он достаточно сложен. Сложность эта объясняется теми высокими требованиями к характеристикам, которыми обладают фотошаблоны: микронные размеры элементов, точное совмещение, большие рабочие поля, минимум дефектов. Правильно организовать процесс производства и контроль фотошаблонов может помочь система классификации их по сложности изготовления и уровню характеризующих шаблон параметров (см. табл. 2).

Предположим, изготовляются фотошаблоны для МОП-транзистора с минимальным размером 5 мкм, допуском ±0,1 мкм и критической площадью 0,2 мм². Для этих фотошаблонов по показателям соответствующих групп определяется класс Б41. Для СВЧ транзисторов нужны шаблоны класса Г41, для больших интегральных схем Б44 или Б45 и т. д. Разбиение на классы позволяет отделить

Таблица 2

Система классификации фотошаблонов

Параметры фотошаблона	Группа показателей размера А	Б	В	Г	Д
Минимальный размер, мкм	10	5	2	1	0,5
Параметры фотошаблона	**Группа показателей точности 1**	**2**	**3**	**4**	**5**
Допуск, мкм: на размер (после допуска)	2,0	1,0	0,4	0,2	0,1
на шаг	±1,0	±0,5	±0,2	±0,1	±0,1
Качество края (неровность), мкм	2,0	1,0	0,5	0,2	0,1
Параметры фотошаблона	**Группа показателей дефектности 1**	**2**	**3**	**4**	**5**
Критическая площадь прибора, см²	10^{-3}	10^{-2}	10^{-1}	1	10
Допустимая плотность дефектов, $см^{-2}$	10	1	0,1	0,01	Менее 0,01

производство сложных шаблонов от производства рядовой продукции, например, использовать для наиболее ответственных классов особо плоские стекла, выделить прецизионное оборудование, а также ввести жесткий контроль дефектов. Сведения о дефектах шаблонов и возможных причинах их появления читатель может найти в работе [23].

Хромированные фотошаблоны, широко используемые в настоящее время, характеризуются довольно высокой плотностью локальных дефектов: 3—4 прокола на 1 см². Это приводит к тому, что на сложных фотошаблонах, предназначенных, например, для изготовления больших интегральных схем, около 30% структур оказывается бракованными с самого начала. По мере эксплуатации хромированных фотошаблонов плотность проколов быстро возрастает, и уже после 50—100 контактов фотошаблоны приходится менять. Проколы и другие прозрачные дефекты в пленке металлического хрома возникают, в первую очередь, из-за трудностей получения равномерной мелкокристаллической структуры пленки. Уже отмечалось, что структура пленки хрома зависит от многих факторов: степени вакуума при напылении, скорости напыления, обработки поверхности стеклянной подложки, температуры подложки и т. д.

С хромированными фотошаблонами конкурируют так называемые «транспарентные» фотошаблоны, получившие свое название за достаточно высокое пропускание видимого света элементами

шаблона. В УФ диапазоне света пропускная способность так шаблонов мала, и их можно успешно применять для фотолитографии. Сквозь рисунок фотошаблона хорошо различимо изображение, полученное ранее на полупроводниковой пластине, что облегчает операцию совмещения. Основным достоинством транспарентных фотошаблонов является более низкая, чем у хромированных, плотность проколов [27]. Известны несколько типов плено применяемых для транспаренти фотошаблонов; наиболее освоено лучение пленок окиси железа.

Нанесение пленок окиси желе осуществляют реактивным распы лением либо разложением металл‹о ганических соединений. В устано реактивного распыления долж быть предусмотрен нагрев стекл ных подложек и вращение карусе с подложками. Мишень изготовля из чистого железа «Армко». Ре мы напыления на модифициров ной установке УРМ 3279013 прив дены в работе [24]: давление 1 $\times 10^3$ Па; ток мишени 180—300 м ток накала катода 50—60 А; т анода 1,8—2,5 А; напряжение мишени 2–2,5 кВ. Для улучшени качества травления элементов м лых размеров предложено [20] н носить пленки из смеси окиси желе за и окиси ванадия (до 90%). Методика нанесения пленок окиси желе за из паровой фазы металлоорган ческого соединения проще, чем м тод реактивного распыления.

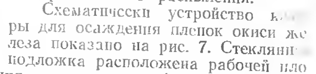


Рис. 7. Устройство камеры для осаждения пленок окиси железа:

1 — нагреватель; *2* — подложка, *3* — реактор; *4* — вытяжка.

Схематически устройство ка ры для осаждения пленок окиси железа показано на рис. 7. Стеклянн подложка расположена рабочей пло скостью вниз для уменьшения количества дефектов в пленке. Углекислый газ пропускают [25] сквозь сосуд с $Fe(CO)_5$, находящимся при комнатной температуре, и затем смешивают с кислородом, необходимым для протекания реакции; можно при менять смесь кислорода с азотом для более гибкого управлени скоростью осаждения. Оптимальная температура подложек около 100°С, выше 160°С ее увеличивать нельзя, так как получаемые пр этом пленки плохо травятся. Один из вариантов газовой смеси: 200 см³/мин углекислого газа и 10 см³/мин кислорода. Скорост роста пленки сильно зависит от расхода кислорода и изменяетс в пределах от 70 до 160 нм/мин при увеличении расхода от 5 д 20 см³/мин.

Травление пленок окиси железа осуществляют в смеси кон центрированной соляной кислоты и воды (1 : 1). Скорость травле ния в этом составе порядка 10 нм/с, причем она в большой степени зависит от температуры подложки при осаждении. Явная зависи мость скорости травления от температуры получения и обработк

окиси железа позволяет использовать ее в качестве неорганического фоторезиста. Для облучения пленок окиси железа толщиной около 0,25 мкм может быть использован сфокусированный луч ионно-аргонового лазера мощностью 1,5—2,5 Вт. Отношение скоростей травления облученных и необлученных участков достигало 25. При скорости сканирования $2\cdot10^3$ см/с удается получить линии шириной 1 мкм; плотность мощности при этом составляет 10 Вт/мм².

Толщина пленок окиси железа в транспарентных фотошаблонах лежит в пределах от 120 до 240 нм. Сквозь пленки такой толщины проходит часть (около 10%) актиничного излучения, и это необходимо учитывать при подборе режимов фотолитографии. У хромированных фотошаблонов непрозрачные элементы полностью экранируют актиничное излучение, и переэкспонирование здесь менее опасно. Напомним, что эффекты переэкспонирования особенно четко проявляются при наличии зазора между шаблоном и фоторезистом, когда возникают дифракционные явления. Если в области тени под непрозрачным элементом хромированного фотошаблона происходит монотонный спад интенсивности падающего света, то под полупрозрачным элементом транспарентного фотошаблона распределение интенсивности приобретает осциллирующий характер. Это объясняется тем, что вблизи края в области тени интерферируют два луча: прошедший сквозь пленку окиси железа и дифрагированный на ее краю.

По обе стороны от геометрического края элемента расположатся чередующиеся светлые и темные полосы, параллельные контурам элемента. В результате может возникнуть так называемый «двойной край», приводящий к искажению размеров элементов и ограничивающий воспроизведение малых элементов изображения фотошаблона. В области окна, где резист должен быть удален, остаются полоски резиста, соответствующие минимумам интенсивности, а вокруг окна в слое резиста появляются щели, совпадающие с максимумами интенсивности. Строго говоря, подобные явления относятся к экспонированию монохроматическим светом, однако на практике оказывается, что при контактной фотолитографии реализуются условия для возникновения диффузионных картин. Действительно, стеклянный фотошаблон, имеющий коротковолновую границу пропускания света, в сочетании со слоем фоторезиста, поглощающим свет только до определенной длинноволновой границы, образует фильтр со спектральным интервалом $\Delta\lambda=0{,}32$—0,43 мкм. В работе [26] оценены для этого случая величина спектрального размытия дифракционных максимумов и когерентная длина вдоль волнового фронта. Оказалось, что размытие максимумов составляет всего $\sqrt{\Delta\lambda}/\sqrt{\lambda}\approx15\%$, а когерентная длина определяется соотношением $l_{\text{ког}}\approx\lambda R/b\approx10$ мкм (где $R=10$—13 см — расстояние от источника света до конденсора; $b=0{,}4$—0,5 см — линейный размер источника).

Последнее означает, что при контактной фотолитографии вполне могут возникать чередующиеся максимумы и минимумы на расстояниях до 10 мкм по обе стороны от геометрической границы элемента. Отсюда следует вывод, что работа с транспарентными фотошаблонами требует тщательного подбора экспозиции и обеспечения минимального зазора между фотошаблоном и резистом. Если выполнять это важное требование, можно добиться заметного улучшения качества фотолитографии, заменив хромовые фотошаблоны транспарентными. Так, по данным зарубежных и отечественных ра-

бот, плотность проколов в пленках окиси железа лежит в пределах 0,1—0,5 дефект/см². Понижение плотности проколов объясняется тем, что, в отличие от хрома, пленки окиси железа имеют более равномерную структуру.

Еще лучшую однородность обеспечивают пленки кремния. Кремний поглощает сильнее, чем окись железа, и для фотошаблонов достаточно толщины пленки 75—80 нм. Пленки кремния получают вакуумным напылением, реактивным распылением, осаждением из паровой фазы; последний способ представляется наиболее подходящим. На пленках кремния можно получить элементы изображения размерами ~1 мкм, причем перетравливание не вызывает сильного изменения размеров. Наносить фоторезист на пленки кремния, как и на пленки окиси железа, следует сразу же после осаждения пленок, в противном случае адгезия резиста к их поверхности ухудшается (особенно это относится к пленкам кремния). Если такая пленка находится долго на воздухе, рекомендуется обрабатывать фотошаблон перед нанесением резиста в спиртосодержащих составах или сразу защищать специальным покрытием, удаляемым перед фотолитографией [27]. Плохая адгезия кремниевых пленок имеет и положительную сторону: при эксплуатации к таким фотошаблонам не прилипает резист, они меньше пачкаются и не требуют столь частой отмывки, как хромированные (после 10—20 контактов). Фотошаблоны на пленках окиси железа и кремния обладают высокой износоустойчивостью: в 4—5 раз больше, чем хромированные, т. е. позволяют осуществлять до 500 контактов [27].

3. Технология фотолитографии

Процесс контактной фотолитографии, схема которого приведена на рис. 8 начинается с **обработки подложек.** В производстве современных полупроводниковых приборов чаще всего используются кремниевые подложки, на поверхность которых нанесены пленки двуокиси кремния, примесно-силикатных стекол (фосфоро- и боросиликатных) металлов (алюминия, молибдена).

Для оценки качества подложки применяют визуальный контроль и измерение угла смачивания каплей воды [61]. При визуальном контроле в темном поле микроскопа при увеличении около 200X фиксируют поверхностные загрязнения, проявляющиеся в виде светящихся точек. Контроль осуществляется обычно в 5 областях, допустимое количество точек в поле зрения микроскопа зависит от сложности прибора: для больших интегральных схем, например, допускается не более 1—2 светящихся точек.

Измерения угла смачивания каплей воды производят с помощью установки контроля угла смачивания

(УКУС). На подложку наносят каплю чистой воды, и на экране проектора измеряют угол $\Theta_{\text{в}}$, образуемый ею с плоскостью подложки. Этот угол дает косвенную информацию об адгезии слоя фоторезиста, указывая на степень смачиваемости подложки водными растворами травителей. Чем меньше $\Theta_{\text{в}}$, тем, очевидно, больше подтравливание под защитными участками; чем больше угол смачивания водой, тем лучше качество фотолитографии.

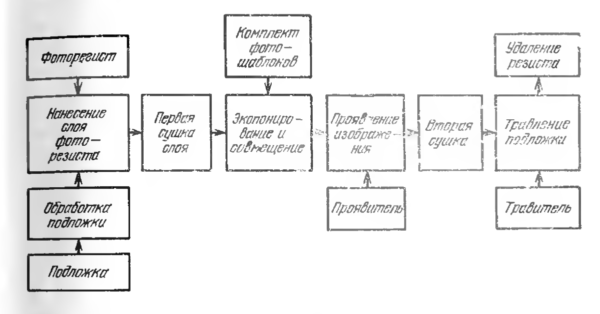


Рис. 8. Схема процесса контактной фотолитографии.

В настоящее время методику измерений угла $\Theta_{\text{в}}$ довольно широко применяют для оценки характеристик поверхности пластин кремния; достаточно высокая чувствительность методики позволяет контролировать нарушения процессов окисления и диффузии, загрязнения пластин, изменения их свойств при хранении и т. д. Среднеквадратичная ошибка метода не превышает ±2,6% в интервале значений углов от 15 до 55° [28], т. е. метод в достаточной мере воспроизводим и точен.

На поверхности двуокиси кремния могут находиться силоксановые (Si—O—Si), силанольные (Si—OH) группы или молекулы адсорбированной воды, причем если вода образовала с поверхностью окисла прочные связи (например, водородную связь), то удалить ее очень трудно. Соответственно угол смачивания водой меняется от 50—55° для чистой силоксановой поверхности, полученной окислением в сухом кислороде, до 30—32° для окисления в парах воды под давлением. При хранении

окисленных пластин на воздухе происходит медленное уменьшение угла смачивания из-за адсорбции воды: исходное значение $\Theta_в=55°$ падает до 42—45° через 2 ч и до 39—41° через 24 ч. Резко понижает угол смачивания обработка окисла в воде, кислотах (азотной или серной) и особенно в растворах, содержащих плавиковую кислоту.

На окисленные подложки, полученные обычным термическим окислением в сухом кислороде или парах воды, фоторезист лучше всего наносить сразу (в течение 1 ч) после окисления без каких-либо дополнительных обработок. Если подложки долго хранились или окисел с самого начала был гидрофильным, желательна термообработка. Минимальная температура обработки в сухом азоте в течение 1 ч составляет 700° С. Обработка в том же режиме, но во влажном кислороде малоэффективна (угол смачивания около 25°). Наилучшие результаты дает короткая (5 мин) обработка при температурах выше 1000° С, причем среда почти не играет роли. Обработка под ИК лампой типа ЗС-3 в течение 30 мин также позволяет получить большие углы смачивания.

Фосфоросиликатные стекла, в отличие от двуокиси кремния, имеют резко выраженную гидрофильную поверхность — угол смачивания водой равен 13—15° и соответственно качество фотолитографии намного хуже. Поверхностные свойства фосфоросиликатных стекол зависят от соотношения пятиокиси фосфора и двуокиси кремния. Обычно создается фаза, богатая пятиокисью фосфора, например, при получении эмиттерных слоев с высокой поверхностной концентрацией, при геттерировании примесей и т. д. Пятиокись фосфора гигроскопична и активно поглощает влагу. Возможно также образование на поверхности стекол гидроксильных групп по следующей схеме: координационное число фосфора уменьшается с 5 до 4 при построении фосфоросиликатного стекла; появляется немостиковый кислород, который легко связывается с протоном, возникающим при окислении, в гидроксильную группу. Следует стремиться к тому, чтобы концентрация пятиокиси фосфора не превышала требуемой. Поскольку каждый атом фосфора связывает ион натрия, для стабилизации параметров прибора достаточно обеспечить концентрацию фосфора в стекле не выше $10^{17}—10^{18}$ $см^{-3}$. Качество же фотолитографии при этом резко улучшается. К сожалению,

регулировать содержание пятиокиси фосфора в стекле трудно и обычно оно намного выше. Можно рекомендовать получение фосфоросиликатного стекла разложением смеси четыреххлористого кремния и фосфина (50:1) при температуре 250—550° С. Качество фотолитографии на фосфоросиликатном стекле можно улучшить, обработав его в органосиланах.

В работе [29] исследовано влияние обработки подложек в растворе диметилдихлорсилана в трихлорэтилене на углы смачивания водой и фоторезистом, а также на качество травления (изменение размеров и клин подтравливания). Оптимальными режимами обработки считаются следующие: выдержка в 10%-ном растворе диметилдихлорсилана (1 мин), промывка в чистом трихлорэтилене (1 мин) и термообработка при 450° С на воздухе (45 мин). Эта обработка резко снижает отклонение размеров (примерно на порядок) при травлении и уменьшает влияние перетравливания.

Объясним качественно явления, происходящие при обработке в диметилдихлорсилане. Известно, что диметилдихлорсиланы охотно реагируют с водой, образуя гидроксильные соединения — силиколы:

$$(CH_3)_2SiCl_2+2H_2O=(CH_3)_2Si(OH)_2+2HCl.$$

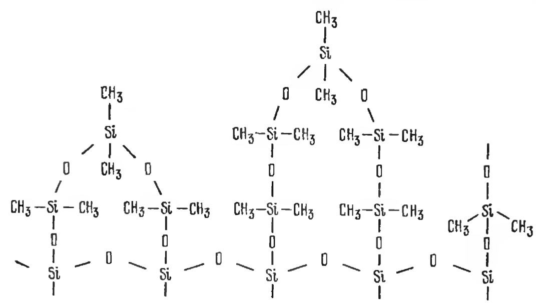
Силиколы неустойчивы, они отдают гидроксильные группы, превращаясь в силиконы

$$(CH_3)_2Si(OH)_2-H_2O=(CH_3)_2Si\begin{cases}O-\ldots\\ \ldots\end{cases},$$

которые склонны к полимеризации, причем скорость, с какой образуются цепи, зависит от характера органического радикала. Диметилдихлорсилан быстро полимеризуется в це́пи, строение которых аналогично силоксановым цепям на поверхности кремния. Во влажной среде свободные связи силоксановой цепи насыщаются гидроксильными группами и гидрофобная силоксановая поверхность превращается в более гидрофильную силанольную. Дальнейший контакт с влагой приводит к тому, что на поверхности адсорбируются молекулы воды.

Строение фосфоросиликатного стекла аналогично строению двуокиси кремния. Фосфор может сам образовывать стекло в «пустотах» двуокиси кремния. «Лишний» по сравнению с двуокисью кремния атом кислорода обусловливает большую гигроскопичность фосфоросили-

катного стекла, так как к нему легко присоединяется протон, образуя гидроксильную группу. Поверхность фосфоросиликатного стекла гидрофильна, углы смачивания водой малы и качество фотолитографии низкое. При обработке двуокиси кремния или фосфоросиликатного стекла в диметилдихлорсилане происходят следующие реакции. Сначала отщепляются гидроксильные группы, и вместо них присоединяются цепочки силиконов



Все свободные связи на поверхности заняты органическими радикалами, так что ни вода, ни резист ее не смачивают. Увеличивая концентрацию диметилдихлорсилана в растворе или повышая температуру раствора, достигают более полной замены гидроксильных групп.

При термообработке происходит разрыв связей между кремнием и органическими радикалами. Для разрыва изолированной связи Si—C достаточно превысить 350° С, но, очевидно, требуемое качество поверхности достигается при более высоких температурах, порядка 400—450° С. Поверхностные свойства фосфоросиликатного стекла и двуокиси кремния становятся похожими. Высокотемпературную термообработку стекол, аналогичную приведенной для двуокиси кремния, вряд ли можно рекомендовать, так как их геттерирующие свойства теряются. Полезна инфракрасная сушка в течение 30 мин, увеличивающая у фосфоросиликатных стекол угол смачивания водой от 15 до 35°.

Пленки алюминия характеризуются большим разбросом поверхностных свойств, часто резист плохо смачивает поверхность подложки. Изменения поверхностных свойств алюминия, вероятнее всего, связаны с условиями напыления, когда пленку загрязняют остатки вакуумного масла и материал испарителя. Одним из средств борьбы с нестабильностью свойств пленки является напыление алюминия электронно-лучевым методом из капли расплава.

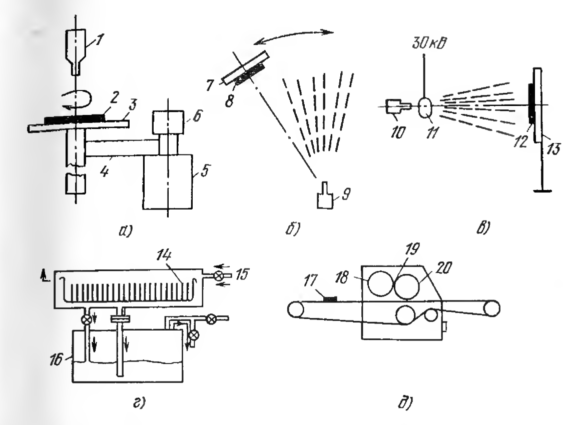


Рис. 9. Способы нанесения фоторезистов:

а — центрифугирование; *б* — распыление; *в* — электростатическое нанесение; *г* — окунание; *д* — нанесение валками; *1* — дозатор для подачи резиста; *2* — подложка; *3* — столик центрифуги; *4* — привод; *5* — двигатель; *6* — тахометр; *7* — нагреваемая планшайба; *8* — подложка; *9* — форсунка подачи резиста; *10* — форсунка; *11* — кольцо для зарядки резиста; *12* — подложка; *13* — заземленный пьедестал; *14* — подложки; *15* — фильтрованный сжатый воздух; *16* — емкость для сбора резиста; *17* — подложка; *18* — ведущий ролик; *19* — подача резиста; *20* — ролик нанесения.

Нанесение слоя резиста на подложку чаще всего осуществляется центрифугированием (рис. 9, *а*). При включении центрифуги жидкий фоторезист растекается под действием центробежных сил. Прилегающий к подложке граничный слой формируется за счет уравновешивания центробежной силы, пропорциональной числу оборотов, и силы сопротивления, зависящей от когезии молекул резиста. С какой-то точностью когезия характеризуется вязкостью раствора, так что толщина слоя прямо пропорциональна вязкости и обратно пропорциональна числу оборотов центрифуги. Для больших изменений толщины

слоев применяют обычно регулировку вязкости резиста, а подбирая число оборотов, добиваются точно требуемой толщины.

Время центрифугирования мало влияет на параметры слоя; для формирования слоя достаточно 20—30 с. Если резист подается из дозатора или капельницы на неподвижную подложку, время между нанесением жидкого резиста и включением центрифуги должно быть минимальным (0,5—1 с), чтобы вязкость резиста не менялась в результате испарения растворителей.

При центрифугировании на краю подложки всегда возникает утолщение (валик), ширина и высота которого зависят от вязкости резиста, скорости вращения центрифуги и формы подложки (например, на некруглых подложках трудно избавиться от валика). Здесь уместно подчеркнуть, что практически невозможно для фоторезиста любой вязкости подобрать такие скорости вращения, чтобы достичь требуемой толщины слоя. Например, попытка получить толстые слои на резистах с малой вязкостью, снижая скорость вращения, приведет к резкому возрастанию ширины валика, так что придется увеличить и вязкость, и скорость нанесения.

В слое, нанесенном на центрифуге, всегда есть внутренние напряжения; плотность дефектов довольно высока, в частности, благодаря тому, что пыль из окружающей среды засасывается в центр вращающегося диска (диск является своеобразным центробежным насосом). В настоящее время нет установившегося мнения о том, каково должно быть ускорение центрифуги. С одной стороны, считается, что разгон должен занимать минимальное время (миллисекунды), т. е. должна почти мгновенно устанавливаться та скорость, на которой формируется слой требуемой толщины. Для достижения этой цели разработаны специальные конструкции центрифуг. С другой стороны, практический опыт говорит о том, что медленный разгон или даже двухступенчатое (сначала медленное, затем быстрое) изменение скорости позволяет получать гораздо более качественные слои резиста. Особенно это относится к такому резисту, как ФП-383, в котором светочувствительный продукт имеет невысокую предельную растворимость (в данном растворителе). При нанесении ФП-383 в режиме с быстрым разгоном почти всегда наблюдаются уже упоминавшиеся выше «лучи»; при первоначально медленном вращении

удается получить более равномерные по качеству слои. В любом случае следует помнить, что толщина слоя и его качество зависят при центрифугировании от: типа резиста и его вязкости; максимальной скорости вращения; ускорения центрифуги; температуры и влажности окружающей среды; свойств поверхности подложки.

Кроме центрифугирования известны такие методы нанесения фоторезистов, как распыление, электростатическое нанесение, окунание (или купание), полив. Нанесение фоторезиста распылением (рис. 9, *б*) позволяет получать широкий интервал толщины слоев, причем подложка может иметь неплоскую поверхность. Фоторезист наносится из пневматического пистолета-распылителя. Параметры слоя зависят от давления и температуры воздуха, расстояние от сопла до подложки, вязкости резиста и концентрации сухого продукта, типа растворителя. При электростатическом нанесении (рис. 9, *в*) фоторезист диспергируется либо с помощью форсунки, либо само электрическое поле дробит жидкость на мелкие капли диаметром примерно 10 мкм. Заряженные капли ускоряются полем и осаждаются на подложку. Электростатическое нанесение осуществить сложнее, чем простое распыление, поскольку приходится дополнительно учитывать электрические свойства резиста: удельное сопротивление и диэлектрические потери. Основной трудностью при нанесении резиста распылением является устранение пыли и других загрязнений, притягиваемых электростатическим полем или струей воздуха.

В последнее время особое внимание уделяется нанесению фоторезистов поливом или окунанием (рис. 9, *г*). Разрабатываются специальные фоторезисты, например KAR-3 [30], непригодные для центрифугирования, но дающие равномерные слои при окунании подложки. Фоторезист KAR-3 характеризуется низкой вязкостью (10—14 сп) при большой концентрации твердого вещества (24—26%); в паспорте резиста указывается зависимость толщины слоя от скорости извлечения подложки из раствора: от 1 до 4 мкм при изменении скорости от 5 до 30 см/мин.

Используется для нанесения резиста и валковый метод. Установка конвейерного типа (рис. 9, *д*) обеспечивает равномерность толщины слоя в пределах ±5% и пригодна для нанесения резиста на подложки любого типа: от печатных плат до кремниевых пластин [31].

Основные причины возросшего интереса к этим методам: минимальная плотность дефектов в слое, высокая производительность, большие возможности автоматизации процесса.

Первая сушка заканчивает формирование слоя фоторезиста. При удалении растворителя объем полимера уменьшается, слой стремится сжаться, но жестко скрепленная с ним подложка препятствует этому. Возникающие напряжения и характер их распределения определяются свойствами фоторезиста и режимами сушки.

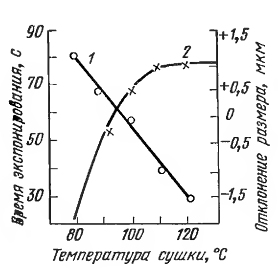


Рис. 10. Зависимость времени экспонирования (*1*) и точности передачи размера элемента (*2*) от температуры сушки.

Роль первой сушки обычно недооценивают, считая, что на этой операции достаточно удалить растворитель. Что это далеко не так, особенно для позитивных резистов, можно убедиться, взглянув на рис. 10, где приведена зависимость от температуры сушки таких важных параметров, как время экспонирования и точность передачи размера элемента после проявления. Надо отметить, что при первой сушке колебания температуры могут достигать 10°С за счет несовершенства нагревательных камер, ошибок оператора, неправильной конструкции держателя подложек. Особо опасны перепады температуры внутри камеры и слишком быстрый нагрев. Максимальную температуру сушки выбирают для конкретного типа фоторезиста, исходя из констант термолиза светочувствительных молекул [6]; при превышении этой температуры изображение или не проявляется, или для его проявления требуется большое время, в результате чего растет плотность дефектов и падает точность передачи размеров элементов.

Для сушки используют термостаты или ИК установки, позволяющие значительно сократить (по сравнению с термостатами) время сушки. Опробован метод сушки в СВЧ печах, для которого требуются всего лишь секунды. Сообщалось, что при СВЧ прогреве не только

резко повышается производительность, но и устраняется опасность «перегрева» фоторезиста (впрочем, это явление пока не объяснено). Улучшается также качество проявления: изображение появляется мгновенно после погружения в проявитель. Для сушки резистов используются печи мощностью 200—400 Вт, работающие на частоте 2,45 ГГц.

Экспонирование и проявление неразрывно связаны между собой. В силу этого для выбора режимов, обеспечивающих точную передачу размеров, необходимо одновременно изменять время проявления и экспонирования. На практике, однако, часто пользуются методом подбора оптимального значения одного параметра при фиксации другого. С грубым приближением находят времена экспонирования и проявления, при которых получается удовлетворительное качество рельефа. При работе с позитивными резистами проверяют плотность проколов в слое резиста данной толщины, для чего на пластинку окисленного кремния с известной плотностью дефектов в окисле наносят слой резиста, высушивают его и проявляют в течение времени, примерно вдвое большего, чем найденное в начале время проявления. Затем проводят вторую сушку и травление и определяют, насколько увеличилась плотность дефектов в окисле за счет проникновения травителя сквозь проколы в слое резиста. При этом предполагается, что рост плотности дефектов вызван только процессом проявления; это допустимо, так как проявление действительно является основной причиной увеличения плотности дефектов в слоях позитивных фоторезистов. Рекомедуется для сравнения проверять плотность дефектов на непроявленном слое. Если при максимальном времени проявления плотность дефектов слишком велика, следует увеличить толщину слоя или сменить фоторезист и снова повторить описанные выше процедуры.

Окончательно для любого типа резистов снимают зависимости точности передачи размеров изображения от времени проявления при фиксированном времени экспонирования и от времени экспонирования при фиксированном времени проявления; в результате находят оптимальные времена, соответствующие точности передачи, близкой к единице. Подбирая время экспонирования, следует тщательно стабилизировать остальные факторы, влияющие на точность передачи размеров изображения:

колебания освещенности; неизбежный зазор между фотошаблоном и резистом; повышение температуры слоя, иногда возникающее при экспонировании.

Для контроля относительной освещенности применяют люксметры типа Ю-16. Рекомендуется проверять равномерность освещения пластины в 20—30 точках. Это поможет избавиться от серьезных ошибок, когда изменение размеров изображения приписывают изменению времени экспонирования, а на деле оно вызвано колебаниями освещенности по площади пластины.

За счет зазора между шаблоном и резистом возникает френелевская дифракция, особенно заметная при малых размерах изображения. Для уменьшения величины зазора обычно применяют вакуумный или пневматический прижим шаблона.

Использование для экспонирования мощных ртутных ламп иногда вызывает нагрев столика установки совмещения и самой подложки со слоем фоторезиста. Это может привести к возникновению негативного изображения, особенно если экспозиция подобрана неверно и является слишком большой. Например, негативное изображение на слое позитивного резиста образуется под действием побочных реакций, инициируемых нагревом или переэкспозицией и дающих продукты, не растворимые в щелочном проявителе.

Современные установки для экспонирования и совмещения представляют собой сложные оптико-механические комплексы. Метод совмещения, используемый в установках, может быть визуальным или фотоэлектрическим; от него зависит точность, разрешение и производительность процесса. В последнее время созданы фотоэлектрические установки совмещения, точность которых в принципе может достигать ±0,1 мкм, но практически равна ±0,85 мкм. Для работы таких установок требуются специальные опорные знаки: на шаблоне непрозрачные штрихи, на подложке вытравленные канавки, ширина которых в 2—4 раза больше, чем штриха. Предварительно проводится с помощью оптического микроскопа грубое совмещение, после чего включается фотоэлектрический микроскоп и точное совмещение осуществляется либо вручную по показанию гальванометров, либо автоматически, если введена обратная связь на микроманипуляторы столика.

Разрешающая способность или минимальный размер изображения при визуальном методе определяются характеристиками микроскопа установки. Как правило, применяют микроскопы с увеличением, изменяемым плавно или дискретно в пределах от 40—80× (обзор) до 100—400× (точное совмещение); минимальные размеры изображения около 1 мкм.

Точность совмещения в установках зависит, в первую очередь, от принципа работы и качества выполнения микроманипуляторов. Наиболее точно работают манипуляторы, представляющие собой двойной спаренный параллелограмм с винтовым приводом. Манипуляторы способны обеспечить точность перемещения ±0,1 мкм, но реальная точность визуального совмещения составляет обычно ±1 мкм и определяется рядом факторов. Среди них следует указать размер и контрастность знаков совмещения, форму знаков, а также постоянство этих параметров в процессе технологических обработок подложки. Оптимальными могут считаться знаки, образующие при совмещении штрих, вписанный между двумя другими штрихами. Конкретно, ширина штрихов может равняться 3 мкм, длина в 10 раз больше ширины, контрастность 0,3—0,4. Зазоры между совмещенными штрихами должны составлять 4—7 угл. мин. Следует учитывать, что при окислении и травлении размеры знаков меняются. На точность совмещения влияют геометрические и оптические свойства подложек, а также субъективные особенности оператора. Совмещение формально представляет собой дискретный последовательный процесс, осуществляемый в системе глаз — рука с обратной связью. Только острота зрения зависит от диаметра зрачка, адаптации глаза, места изображения на сетчатке, спектрального состава излучения, яркости фона и регистрируемых объектов и т. д. Отбор операторов обычно происходит стихийно, но, возможно, следует разработать специальные тесты.

Производительность установок в основном зависит от длительности самого совмещения и быстродействия дополнительных устройств загрузки — выгрузки подложек. Рабочее время современных установок составляет 45—60 с для обычных и 5—15 с для автоматических. Максимальная производительность достигается на автоматических системах, где применены фотоэлектрический метод совмещения, автоматический дозатор энергии экспонирования, поточная подача подложек; такая си-

стема заменяет 8—15 операторов [32]. Для них не требуется обеспечения одновременной резкости изображения на шаблоне и подложке, как при визуальном совмещении, что является большим достоинством фотоэлектрических установок. Появляется возможность установить большой зазор при совмещении и практически устранить износ фотошаблонов. Любопытный вариант увеличения срока службы фотошаблонов реализуется в установках с постоянным зазором, остающимся и после совмещения, при экспонировании. Конечно, на таких установках трудно получить изображения размерами менее 3—4 мкм. Но не стоит забывать о том, что при экспонировании с зазором не передаются мелкие дефекты, т. е. там, где требования к дефектности высоки, а к разрешающей способности низки, применение подобного принципа весьма полезно. Сведения о современных установках совмещения можно найти в работе [20].

Проявление негативных резистов является процессом удаления экспонированных участков в органическом растворителе: толуоле, трихлорэтилене и т. д. Для позитивных резистов проявление — более сложная химическая реакция и проведение ее требует особой тщательности.

Для проявления позитивных резистов используют водные щелочные растворы: (0,3—0,5) %-ный раствор едкого калия, (1—2) %-ный раствор тринатрийфосфата, органические щелочи — этаноламины. В настоящее время повсеместно применяют способ пульверизации проявителя, улучшающий качество проявления (особенно при малых размерах изображений) и позволяющий автоматизировать процесс.

При проявлении очень важно контролировать температуру и величину pH проявителя. При изменении величины pH всего лишь на десятую долю размер элемента меняется примерно на 10% от номинала.

Сушка проявленного слоя проводится при температуре 120—180° С. От температуры и характера повышения ее во время сушки зависит точность передачи размеров изображений. Резкий нагрев вызывает оплывание краев, поэтому для точной передачи малых (1—2 мкм) размеров следует применять плавное или ступенчатое повышение температуры. Примерный режим обработки позитивного резиста ФП-383: 10—15 мин при комнатной температуре, 20—25 мин в термостате при 120° С, затем

переключение термостата на 150—160° С и нагрев до этой температуры.

Травление с защитой рельефом из резиста применительно к подложкам различного типа рассмотрено в гл. 4.

Удаление фоторезиста приобретает исключительно важное значение, так как от этой операции зависит качество последующих технологических операций: окисления, диффузии, нанесения металла и др. Распространено мнение, что поскольку между фотолитографией и этими операциями всегда происходит очистка (отмывка) пластин, то удаление фоторезиста сводится только к разрушению и снятию полимеризованного рельефа из фоторезиста. Это не так: удаление само по себе должно обеспечивать хорошую очистку поверхности от загрязнений, внесенных в процессе фотолитографии.

В настоящее время используются следующие методы удаления фоторезиста: деструкция полимера (например, сульфированием в серной кислоте); обработка в органических растворителях; плазмохимическая, термическая или фототермическая обработка, сводящаяся в основном к окислительной деструкции в кислороде или кислородосодержащих газах.

Химическая деструкция, например, позитивного резиста в серной кислоте приводит к образованию коротких цепей полимера (новолака) и сульфированных мономеров НХД групп. После обработки в серной кислоте требуется только отмывка водой. Эффективное сульфирование идет в нагретой до 160° С концентрированной кислоте, причем раствор быстро истощается. Кроме чистой серной кислоты применяют ее смеси с двухромовокислым калием (хромпиком) либо с перекисью водорода. Последнее предпочтительнее, так как в хромпике содержатся ионы калия, которые могут привести к нестабильности параметров планарных приборов. Смесь серной кислоты с 30%-ной перекисью водорода (3:1) обеспечивает при более низкой температуре (70—100° С) хорошую очистку поверхности.

Удаление фоторезиста химической деструкцией серной кислотой весьма эффективно, но не применимо для металлизированных подложек. Замечено также [33], что при нагревании серной кислоты свыше 160° С может образоваться пленка сернистого кремния, влияющая на процессы окисления и диффузии.

Для удаления резиста с металлических поверхностей применяются такие органические растворители, как ацетон, метилэтилкетон, целлозольв. Практикуют длительные выдержки (до 1 сут) пластин в органических растворителях с последующим удалением разбухшего рельефа механически (тампоном). Добавление к органическим растворителям органических оснований (этаноламинов) улучшает качество процесса. Так, достаточно эффективное удаление фоторезиста с алюминия осуществляют в нагретой до 80° С смеси диметилформамида с моноэтаноламином (1:1); эту операцию повторяют дважды, контролируя качество удаления в темном поле микроскопа. Качество удаления в органических растворителях в большой мере зависит от температуры второй сушки. Желательно подобрать такие режимы фотолитографии, чтобы эта температура была минимальной (не выше 120° С). При глубокой полимеризации резиста, наступающей при 150—200° С, органическими растворителями не удается удалить рельеф с подложки даже при дополнительном механическом воздействии, т. е. протирке тампоном или ультразвуковой обработке.

Ограниченные возможности химических методов обусловили необходимость разработки более эффективных способов удаления фоторезиста, в первую очередь, с металлических поверхностей. Так, было найдено, что при обработке резиста в среде кислорода при температурах 700—800° С происходит одновременно окислительная и термическая деструкция, резист удаляется с большой скоростью. Освещение подложки УФ светом позволяет резко снизить температуру обработки: резист удаляется при 250°С за 25—40 мин [34]. Добавление 2% озона ускоряет процесс удаления резиста.

Все более широкое применение находит в последние годы плазмохимический метод удаления [33], в основе которого лежит обработка в низкотемпературной кислородной плазме при давлении $5 \cdot 10^2$ Па. В такой плазме происходит ряд химических превращений, в результате которых образуются активные частицы: атомарный кислород, озон и возбужденные молекулы кислорода. Содержание атомарного кислорода, например, может достигать 10—20%, столько же содержится и возбужденного молекулярного кислорода. Органические соединения, такие как фоторезист, под действием активного кислорода разлагаются. Введение 1% азота позволяет

увеличить скорость удаления фоторезиста на 20%, а 1% водорода — на 100% по сравнению со скоростью удаления в чистой кислородной плазме. Это явление объясняется каталитическим действием таких примесей, как водород и азот, на выход атомарного кислорода.

Разрушение резиста под действием плазмы начинается в наиболее уязвимых местах — по двойным связям. Затем образуются продукты с малой молекулярной массой; они улетучиваются и в объеме плазмы подвергаются дальнейшему окислению, разлагаясь до конечных продуктов — углекислого газа и воды.

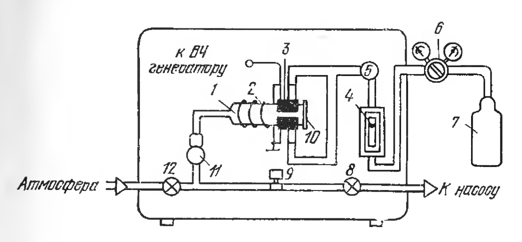


Рис. 11. Схематическое изображение установки плазмохимического удаления фоторезиста:

1 — разрядная камера; *2* — индуктор; *3* — обкладки конденсатора; *4* — ротаметр; *5* — натекатель; *6* — редуктор; *7* — источник газа; *8* — клапан; *9* — вакуумный датчик; *10* — крышка; *11* — вакуум-провод; *12* — выпускной клапан.

Установка для плазмохимического удаления фоторезиста показана схематически на рис. 11. Использование ВЧ генератора позволяет возбуждать разряд электродами, вынесенными за пределы реакционно-разрядной камеры, что обеспечивает чистоту химических процессов. Генераторы работают на частоте 13,56 МГц при выходной мощности на электродах 300—1200 Вт. Кислород поступает в реакционно-разрядную камеру (расход газа 120—1000 см^3/мин) и непрерывно откачивается вакуумным насосом для поддержания давления на уровне $1{,}3 \cdot 10^3$ Па. Реакционно-разрядная камера имеет сложную конструкцию, от которой зависит качество удаления резиста и степень воздействия плазмы на параметры полупроводниковых структур. Дело в том, что в камере возникает электромагнитное поле высокой напряженности, которое вызывает деградацию параметров структур, меньшую у биполярных и весьма сущест-

венную у МОП-структур. Индуцированные ВЧ плазмой заряды накапливаются на поверхности раздела окисел — кремний и ухудшают электрические характеристики. Наблюдалось снижение пробивного напряжения *p—n*-переходов, увеличение токов утечки, появление инверсионных каналов, снижение коэффициента усиления по току транзисторов и т. д. Обработка пластин с МОП-структурами вызывает появление положительного заряда в окисле под затвором; напряжение плоских зон растет, разброс этого параметра от пластины к пластине также увеличивается. Последующий температурный отжиг при 500—1000° С частично снимает эти нежелательные эффекты. Менее чувствительны к обработке в плазме МОП-структуры с кремниевыми затворами и структуры, в которых окисел под затвором легирован фосфором. Кроме того, показано, что, если вслед за удалением резиста в кислородной плазме провести обработку в аргоновой плазме, степень деградации окисла уменьшится [35].

Конструкция камер в установках плазмохимического удаления резиста такова, что газ поступает в реакционный объем через систему трубок, в которых возбуждается собственно разряд. За счет этого пластины отделены от зоны максимальной напряженности поля. Одно из основных требований к реакционно-разрядной камере — обеспечение равномерности процесса удаления. Скорость окислительного разрушения и удаления резиста в плазме зависит от многих факторов: количества активного кислорода, а следовательно рабочего давления в камере, расхода кислорода, падения давления в камере, содержания и типа примесей в кислороде; количества обрабатываемых пластин, точнее, от расстояния между ними в кассете — при малых расстояниях газ как бы задерживается между пластинами и скорость удаления падает; также играют роль положение пластин в камере, геометрические размеры и масса кварцевых кассет; характеристик самой плазмы, определяемых способом ввода кислорода в камеру, местом и методом приложения ВЧ энергии к объему газа; типа фоторезиста и толщины слоя фоторезиста; уровня ВЧ мощности в разряде, от которого, в частности, зависит разогрев резиста и подложки.

Температура тел, находящихся в плазме, может лежать в пределах от 50 до 600° С в зависимости от уровня мощности и давления в камере. Разогрев резиста приводит к увеличению скорости его удаления.

Следует отметить, что плазмохимический метод позволяет удалять с поверхности подложек и неорганические загрязнения, содержащиеся в резисте или попавшие на поверхность при других обработках. Плазмохимическое удаление с одновременной очисткой поверхности производят в ВЧ плазме кислорода и галогеноуглерода (например, фреона). В такой плазме есть и активный кислород, удаляющий органические соединения, и активные химические вещества, реагирующие с неорганическими загрязнениями и превращающие их в газообразные продукты. При этом удаляются олово, железо, мышьяк, свинец, медь, цинк, натрий и т. д. Важное условие эффективности подобной обработки заключается в том, что смесь кислорода и галогеноуглерода необходимо приготавливать непосредственно перед подачей в камеру: разделение двух плазм снижает качество удаления.

4. Практические приемы фотолитографии

Приготовление позитивных фоторезистов. В качестве типичного примера приведем методику приготовления фоторезиста на основе продукта № 27.

Приготавляют растворитель из 150 мл монометилового эфира ацетатэтиленгликоля, 75 мл диметилформамида и 15 мм этилцеллозольва. Затем размельчают в фарфоровой ступке новолачную смолу № 18, тщательно отбирая куски желтого цвета (не розоватого, так как этот цвет имеет окисленная смола, непригодная для приготовления резиста). Растворяют 60 г порошка смолы и 36 г нафтохинондиазида в растворителе, выдерживая в затемненном месте до полного растворения твердых продуктов (не менее 2 сут.). Фильтруют фоторезист через воронку с обеззоленным фильтром 3 раза (тонкая фильтрация через мембранные фильтры осуществляется на рабочем месте по мере надобности). Все работы проводят под вытяжкой, с защитой от актиничного света. Хранят резист в темных бутылках с притертыми пробками.

Составы для проявления. Обычно для проявления позитивных фоторезистов используют 0,05 *М* раствор едкого калия, 2%-ный раствор тринатрийфосфата, добавляя иногда к последнему глицерин для замедления процесса.

Следует учитывать, что у широко применяемого проявителя на основе едкого кали может изменяться величина pH из-за поглощения углекислого газа из воздуха и выщелачивания стеклянной посуды, в которой хранят резист. Этот проявитель рекомендуется готовить с таким расчетом, чтобы он мог быть полностью использован за 8—10 ч.

Стабильные во времени свойства обеспечивают так называемые буферные проявители. Один из них (боратный буферный проявитель) был достаточно полно исследован и показал весьма хорошие характеристики. Состав боратного буферного проявителя определяется соотношением

$$10 \text{ мл } 0{,}05\ M\ Na_2B_4O_7 + x \text{ мл } 0{,}1N\ NaOH,$$

где значения x выбирают, исходя из требуемой величины pH (табл. 3).

Таблица 3

Зависимость между добавкой едкого натра x и величиной pH буферного проявителя

x, мл	11,2	12,0	12,7	14,0	15,0
pH	11,72	11,98	12,12	12,28	12,39

Хорошее проявление с четким краем и точной передачей размеров начинается со значений pH=12,3 — 12,35 (+25°С). Величина pH буферного проявителя остается неизменной в течение месяца и более.

Сравнение четырех типов проявителей: на основе едкого кали и натра, тринатрийфосфата и боратного буферного — показало примерно одинаковые результаты по плотности проколов и точности передачи размеров (табл. 4).

Время проявления в буферном проявителе с pH=12,32 слоя резиста ФП-383 толщиной 0,7 мкм составляет 15 с. В 0,05 *М* KOH с тем же pH это время превышает 3 мин, причем качество проявления хуже. Проявитель на основе едкого кали начинает хорошо «работать» со значений pH=12,65; очевидно, что проявление в более сильной щелочи может привести к повышенной плотности проколов.

Проявителями для негативных фоторезистов служат органические растворители — толуол, трихлорэтилен.

Рецептуры травителей. Монокристаллический кремний. В планарной технологии, как правило, кремний травят с дополнительной защитой окислом, т. е. сначала вскрывают окна в окисле, а затем, не снимая резиста, проводят травление самого кремния. В качестве травителей используют смеси плавиковой, азотной и уксусной кислот в различных соотношениях. Так, например, описаны [48] результаты травления углублений до 30 мкм в составах $HF: HNO_3: CH_3COOH = 2:9:4$ и 1:3:1. Скорость травления составляла 4—8 мкм/мин, боковое подтравливание равнялось примерно половине глубины травления. В работе [36] предложен травитель $HF:HNO_3:AgNO_3 = 1:4:4$, который мало воздействует на маскирующий окисел.

Таблица 4

Сравнительные характеристики проявителей

Проявитель	pH (+25°С)	Плотность проколов, мм$^{-2}$	Относительная точность передачи, %
Боратный буферный	12,32	0,13—0,14	3,05±0,39
0,05 М KOH	12,65	0,17—0,18	3,94±0,47
0,05 М NaOH	12,65	0,27	13,65±1,53
2% Na_3PO_4	12,23	0,14—0,16	4,25±0,84

В последнее время для травления кремния используют анизотропные травители: 10%-ный раствор едкого натра, этилендиамин-пирокатехиновый, гидразиновый и др. [28]. Из-за большой энергии активации эти травители требуют нагрева до высоких температур, близких к температурам их кипения. Фоторезисты не выдерживают такого воздействия щелочи и температуры, так что роль фотолитографии сводится к получению окон в маскирующем окисле. Границы окон в окисле должны быть строго ориентированы. Например, при травлении канавок в пластине кремния с поверхностью (100) необходимо предусмотреть риску или скос вдоль выхода плоскости (111) на поверхность, и фотошаблон располагать так, чтобы

линии канавок или параллельно риске. Тогда стенки канавок будут ограничены плоскостями (111) и идти точно под углом 35° к поверхности, а глубина травления канавки определится шириной окна в окисле (по достижении этой глубины процесс травления остановится). Оптимальный состав травителя в молярных процентах: этилендиамин 35,1%, пирокатехин 3,7%, вода 61,2%, температура травления 110±1°С.

В тех случаях, когда маскирующий окисел нельзя использовать, применяют более толстые слои фоторезиста. Основную роль при этом играет выбор режима второй сушки. В работе [37] для травления на полированной и шлифованной поверхности кремния предлагается состав $HF:HNO_3:CH_3COOH=2:7:2$. Использовался позитивный фоторезист с соотношением НХД: новолак=3 : 7, 10%-ный раствор в диоксане; толщина слоя составляла 5—10 мкм. При минимальном размере окна 100 мкм удавалось вытравливать углубления на такую же величину, применяя ступенчатый режим второй сушки. Вначале проявленный рельеф (толщиной 3 мкм) нагревается в термостате до температуры 100°С, затем следует медленный в течение 3 ч нагрев до 120°С (допустима и 3-ч выдержка при 100—110°С) и, наконец, быстрый нагрев до 180°С, причем выдержка при этой температуре должна быть кратковременной во избежание разрушения резиста.

Поликристаллический кремний. Он травится быстрее, чем монокристаллический, поэтому желательно использовать медленные травители. Для травления тонких слоев поликристаллического кремния пригоден травитель, включающий два состава:

Состав А: 40 ч. азотной кислоты, 1 ч. плавиковой кислоты.
1 ч. раствора азотнокислого серебра (1 г на 100 мл воды).

Состав Б: 2 ч. пропиленгликоля, 2 ч. деионизованной воды.

Перед травлением оба состава смешивают во фторопластовой посуде (1:1) и выдерживают 5 мин при комнатной температуре. Скорость травления в таком травителе 0,1—0,2 мкм/мин, края получаются достаточно четкими; впрочем, это сильно зависит от качества поликристаллического кремния. Для травления толстых слоев (до 200 мкм) поликристаллического кремния применимы анизотропные составы с защитой окислом.

Германий. Наиболее широко используется травитель следующего состава *): 1 ч фтористоводородной кислоты, 1 ч. азотной кислоты, 1 ч. перекиси водорода и 4 ч. воды.

Скорость травления около 3 мкм/мин, степень растравливания не превышает 10% при травлении на глубину не более 10 мкм. Описаны также травители для германия, в которые входят 30%-ная перекись водорода (1 ч), вода (4 ч.) и какой-либо комплексообразователь (1 ч.) — хлористоводородная, уксусная, лимонная, щавелевая или винная кислоты.

Арсенид галлия. Для изотропного травления используют составы: 1) 1 ч. брома и 1000 ч. метилового спирта; 2) 1 ч. 30%-ной перекиси водорода, 5 ч. серной кислоты и 1—2 ч. воды; 3) 3%-ный раствор гипохлорита натрия. Обычно применяют дополнительную защиту окислами кремния или алюминия. Растравливание даже с защитой окисла достаточно сильное — до 20 мкм при размерах окна 100 мкм и глубине травления 25 мкм. Такое большое растравливание и неровность дна лунок, вероятно, связаны с адсорбцией молекул травителя на границах окисловой маски; это затрудняет диффузию молекул. Применение травителя 0,7 М H_2O_2+1 М NaOH, для которого лимитирующим фактором является не диффузный, а химический механизм, позволяет улучшить качество фотолитографии (на негативном фоторезисте). Арсенид галлия, так же, как и другие интерметаллические соединения, можно травить в смесях азотной, фтористоводородной и уксусной кислот, аналогично кремнию.

Анизотропное травление арсенида галлия осуществляют в составе $H_2O_2 — NH_4OH$ [39]. Скорость травления составляет 0,1—0,2 мкм/мин при травлении пластины, ориентированной по плоскости (100).

Арсенид индия, фосфид галлия, антимонид индия. Для травления арсенида индия пригоден ряд составов [40], из которых для фотолитографии чаще применяют следующий: 3 ч. азотной кислоты, 1 ч. фтористоводородной кислоты и 2 ч. воды. Травление при комнатной температуре идет со скоростью около 40 мкм/мин для плоскости (111).

Фосфид галлия травят в смесях азотной кислоты с соляной или фтористоводородной (1:1) [40].

*) В этой главе всюду, кроме оговоренных случаев, имеется в виду (42—46) %-ная фтористоводородная, (67—72) %-ная азотная и ледяная уксусная кислоты.

Антимонид индия можно травить в этих же смесях, добавляя, если нужно замедлить реакцию, 1 ч. воды.

Двуокись кремния. Для травления термически выращенной двуокиси кремния используют составы на основе фтористоводородной кислоты и фторида аммония. Рекомендуемый в зарубежной практике травитель имеет состав: 7 ч. фтористого аммония в 40%-ном водном растворе и 1 ч. фтористоводородной кислоты.

В работе [41] предложен тот же травитель с соотношением 32:2,5, скорость травления при температуре 22±3°C составляет примерно 0,08 мкм/мин. При повышении температуры скорость возрастает и при 40°C достигает 0,22 мкм/мин, т. е. необходимо термостатировать процесс травления. Применяют также травители с другими соотношениями составляющих, например: 1) 10 ч. фтористого аммония, 3 ч. фтористоводородной кислоты и 20 ч. воды; скорость травления 0,12 мкм/мин [42]; 2) 3 ч. фтористого аммония, 1 ч. фтористоводородной кислоты и 7 ч. воды; скорость травления 0,06 мкм/мин [11]. Травители при длительном хранении «стареют», скорость травления уменьшается (примерно на 20%). В работе [11] предложен скоростной травитель (0,22 мкм/мин): 2 ч. серной кислоты, уд. вес 1,135, 1 ч. фтористого аммония.

Примесно-силикатные стекла. Травят в тех же составах, что и двуокись кремния. Иногда уменьшают (вдвое) количество фтористоводородной кислоты, так как скорость травления стекол намного выше, чем двуокиси кремния: до 30 нм/с для фосфоросиликатного стекла и 0,7—1,2 нм/с для двуокиси кремния. В двухслойных системах стекло — двуокись кремния различия в скоростях травления и плохая адгезия резиста к стеклу приводят к значительным растравливаниям. Для борьбы с подобным явлением применяют различные способы. Один из них заключается в том, что стравливают только слой примесного стекла, затем пластину промывают, проводят термообработку при 180—200°C, в результате которой края фоторезистивного рельефа «опускаются» на окисел, и затем травят окисел. Другие способы рассмотрены в гл. 5.

Моноокись кремния. Все травители содержат в тех или иных количествах фтористоводородную кислоту; вводя различные компоненты, можно регулировать скорость и качество травления: 1) 1 ч. фтористоводородной

кислоты, 1 ч. фтористого аммония (50%-ный раствор); скорость травления 0,001 мкм/с; 2) 1 ч фтористоводородной кислоты, 2 ч. фтористого аммония, 7 ч. перекиси водорода и 5 ч. воды; скорость травления 0,025 мкм/с.

Чаще всего травление моноокиси кремния приходится выполнять в составе многослойной системы — разводки металлизации в интегральных схемах или пассивирующих покрытиях. В этих случаях важно, чтобы травитель не воздействовал на другие слои. Рекомендуются следующие составы:

1) Моноокись кремния на слоях молибден — золото — молибден [43]:1 ч. фтористоводородной кислоты, 5 ч. 2%-ного раствора $AgNO_3$, 5 ч. воды;

2) Моноокись кремния на слоях хром — золото — хром [43]: 2 ч. фтористоводородной кислоты, 2 ч. фтористого аммония, 5 ч. азотнокислого серебра, 20 ч. воды;

3) Моноокись кремния на слое $PbO \cdot SiO_2 \cdot B_2O_3 \cdot MeO$ [44]:13 ч. фтористоводородной кислоты, 100 ч. изобутилового спирта, скорость травления 0,5—0,8 мкм/мин.

Нитрид кремния, оксинитрид кремния. Нитрид кремния травится во фтористоводородной кислоте, воздействия которой фоторезисты практически не выдерживают. По этой причине травление проводят с подслоем молибдена. Оксинитрид кремния хорошо травится в том же травителе, который применяют при фотолитографии по алюминию: 7 ч. азотной кислоты, 15 ч. ортофосфорной кислоты, 3 ч. уксусной кислоты, 1 ч. воды.

Окислы металлов. Травление Al_2O_3 осуществляют в нагретой ортофосфорной кислоте. Для травления окиси железа Fe_2O_3 [25] используют водный раствор соляной кислоты (в равном соотношении). При комнатной температуре скорость травления составляет около 3 нм/с и, как уже отмечалось выше, сильно зависит от условий осаждения пленки окиси железа, в частности от температуры осаждения. Окислы индия In_2O_3 и олова SnO_2 химически очень стойки к кислотам (за исключением фтористоводородной кислоты) и их солям. Травить эти окислы можно в нагретых щелочах, но маска из резиста не выдерживает подобной обработки. Поэтому для фотолитографии чуть ли не единственным выходом является использование реакции замены олова или индия активным металлом, например цинком:

$$2HCl + Zn = ZnCl_2 + H_2; \quad SnO_2 + H_2 \xrightarrow{2HCl} SnCl_2 + 2H_2O.$$

Практически цинк вводят в раствор 18%-ной соляной кислоты в виде цинковой пыли [45]. Приготовляют водную суспензию цинковой пыли, наносят ее на пластину и опускают пластину в кислоту. Травление идет только в момент выделения водорода, т. е. цинка должно хватить для образования водорода в течение всего времени травления. Если рельеф полностью не вытравился, можно извлечь пластину, промыть, высушить, проконтролировать под микроскопом, снова нанести суспензию и дотравить до конца.

Хром. Пленки хрома химически очень устойчивы, так как на их поверхности практически всегда имеется тончайший незаметный слой окиси хрома (Cr_2O_3), которая препятствует взаимодействию металла с кислотой (хром стоит в ряду напряжений между цинком и железом и в соляной кислоте должен легко раствориться). Окись хрома растворяется в соляной кислоте при нагревании, ее можно также удалить простым соскабливанием. Однако для фотолитографии наиболее пригоден способ кратковременного приложения небольшого напряжения, которое разрушает слои окиси хрома. Осуществляется это контактированием поверхности хрома, находящейся в растворе кислоты, с металлом (алюминием, цинком, оловом, магнием, сплавами этих металлов и т. д.) Обычно применяют 12—16%-ный раствор соляной кислоты, а для инициирования реакции — алюминиевую проволоку. Реакция интенсивно начинается в месте соприкосновения, а в удаленных участках наблюдается недотравливание. В [46] предложено для улучшения равномерности добавлять в травитель поверхностно-активные вещества типа СВ-104 и СВ-102. Кроме соляной кислоты применяют насыщенный раствор $AlCl_3$, нагретый до 70°С.

Естественным стремлением было избавиться от локального инициирования реакции и ввести восстановитель непосредственно в раствор травителя. Так, описан травитель, представляющий смесь соляной кислоты с гидразин дигидрохлоридом [47]. В работе [46] предложено проводить предварительно активацию в 3%-ном водном растворе боргидрида калия в течение 30 с и затем травить в 25%-ной соляной кислоте. Скорость травления 0,1 мкм/мин, минимальный размер, полученный авторами этой работы, составлял 2 мкм.

В последнее время за рубежом и в отечественной практике для травления хрома успешно применяются

травители на основе солей церия: 1) 164 г аммониевой соли нитрата церия $(NH_4)_2[Ce(NO_3)_5]4H_2O$, 130 мл соляной кислоты, до 1 л воды; 2) 200 мл сернокислого церия, 100 мл соляной кислоты, 10 мл серной кислоты, до 1 л воды. Во втором составе обычно производят дотравливание окон в пленке хрома [20].

Алюминий. При защите позитивными фоторезистами в основном пользуются нагретой ортофосфорной кислотой либо «холодным» травителем, состоящим из смеси ортофосфорной, уксусной, азотной кислот и воды. Ортофосфорная кислота имеет большую вязкость, поэтому удаление пузырьков водорода, образующихся в процессе травления, затруднено; удалять же их необходимо для того, чтобы не оставались непротравленные участки — характерные круглые «пятачки» алюминия. Из-за повышенной вязкости скорость травления ограничена диффузией молекул травителя и, следовательно, зависит от толщины слоя алюминия. В [41] приведены экспериментальные данные: с увеличением толщины алюминия от 0,3—0,8 мкм до 1,2—1,6 мкм скорость снижалась от 0,43 до 0,25 мкм/мин. Отметим, однако, что при напылении более толстых пленок могла изменяться их структура. Уменьшить вредное влияние вязкости травителя помогает вибрация с частотой 30—50 Гц и малой амплитудой; скорость травления при этом возрастает, а ее зависимость от толщины слоя ослабевает. Можно рекомендовать [41] помимо вибрации применять два состава травителей — для тонких и толстых слоев алюминия: 1) для тонких слоев (не толще 1,6 мкм) 45%-ный раствор ортофосфорной кислоты при 60±1° С; 2) для толстых пленок (5—10 мкм) 60 мл ортофосфорной кислоты (1,73 г/см^3), 15 мл изопропилового спирта, 10 мл деионизованной воды. Количества указаны для одновременной обработки 10 пластин; скорость травления 0,33 мкм/мин, температура 60±1°С.

Соотношения компонентов в «холодных» травителях могут быть следующими: 1) 12 ч. ортофосфорной кислоты, 5 ч. уксусной кислоты, 2 ч. азотной кислоты, 1 ч. воды; 2) 75 ч. ортофосфорной кислоты, 15 ч уксусной кислоты, 3 ч азотной кислоты, 5 ч воды. При работе с этими травителями также с успехом применяется вибрация.

В работе [48] описаны следующие составы для работы с позитивными резистами: 1) водный раствор соляной

кислоты (1:4); 2) 36 мл 38%-ного раствора соляной кислоты, 380 мл хлорного железа (40° Боме); травление идет быстро и требует охлаждения; 3) 80 г хромового ангидрида, 14 г фторида аммония, 40 г кадмия уксуснокислого, 0,1 г крахмала, до 1 л воды.

При работе с негативными фоторезистами появляется возможность для травления алюминия использовать щелочные травители: 1 г едкого натра, 88 г феррицианида, 800 мл воды. Хорошие результаты достигаются и без воды при молярном соотношении едкого натра и ферроцианида, равном 20:1 [49]. Травление идет при комнатной температуре. Для негативных резистов на основе циклокаучука использовался травитель состава $H_3PO_4:CH_3COOH:H_2O=1:4:1$ [50].

Молибден. Относящийся к подгруппе хрома молибден химически менее активен: если хром растворяется в разбавленных соляной и серной кислотах, то на молибден они не действуют (в горячих кислотах он растворяется). Кроме того, как и хром, молибден покрыт сверху пассивной окисной пленкой.

Травление молибдена осуществляют в смеси кислот, например азотной и соляной (3:1) или азотной и серной [51]: 12 ч. азотной кислоты, 1 ч. серной кислоты, 7 ч. воды. В этом составе молибден травится с высокой скоростью (примерно 0,8 мкм/мин), окончание травления точно зафиксировать трудно, поэтому наблюдается значительная неоднородность результатов. Лучшее качество фотолитографии обеспечивают более медленные травители, состоящие из смеси азотной, ортофосфорной и уксусной кислот. В табл. 5 приведены рецептуры травителей, описанных в работах по фотолитографии. Скорость травления в них лежит в пределах от 0,2—0,25 мкм/мин (травители № 3, 4) до 0,66 мкм/мин (травитель № 5).

В работе [41] для травления молибдена в системе молибден — золото использован состав, не травящий пленку золота: 10 ч. азотной кислоты, 10 ч. хлорного железа, 20 ч. этиленгликоля. Скорость травления в этом составе 0,06 мкм/мин, хранение более 8 ч не рекомендуется. Для электролитического травления с защитой фоторезистом применяют [51] электролит следующего состава: 40% ортофосфорной кислоты, 16% серной кислоты, 43,5% воды, 0,5% поверхностно-активного вещества, плотность тока 1,16 А/см², температура 60° С. Можно

Таблица 5

Составы травителей молибдена

Номер травителя	Соотношения компонентов (в частях)				Литература
	ортофосфорная кислота	азотная кислота	уксусная кислота	вода	
1	15	7	3	1	—
2	75	3	15	5	[28]
3	7	1	1	1	[52]
4	2	1	2	2	[49]
5	15	2	3	1—3	—

также травить в 30%-ной серной кислоте при токе 0,1 А/см² и комнатной температуре.

Вольфрам. Для травления вольфрама используют смесь аммиака с перекисью водорода в соотношении 3:2 или 4:3 [53]. Скорость травления 40 нм/мин, причем рекомендуется нагревать травитель до 30° С и применять ступенчатое травление с промежуточными стадиями промывки и сушки при 160°С в течение 5 мин. Можно также применять травитель следующего состава: 1ч. NaOH, 3,5 ч. $K_3Fe(CN)_6$, 75 мл H_2O [52]. Однако у обоих травителей мала скорость и большие значения pH. Для снижения степени воздействия на фоторезист предложено использовать травители, в которых ферроцианид калия сочетается со слабыми основаниями, такими, как этилендиамин или аммиак, например 0,5 М этилендиамина — 0,5 М HCl - 0,1 М $K_3Fe(CN)_6$ [54]. У такого травителя pH=7,5—9,5 и скорость травления велика (1 мкм/мин). В работе [54] с помощью указанного состава получали элементы с минимальным размером около 1 мкм. Вольфрам хорошо травится электролитически с защитой негативным резистом в составе: 5% KOH, 5% $K_3Fe(CN)_6$, 1% поверхностно-активного вещества, остальное вода. Скорость травления 5 нм/с при плотности тока 200 мА/см² [55].

Тантал. Травят в смеси азотной и плавиковой кислот (1:1) [52].

Золото. Можно травить в царской водке, но, очевидно, наиболее приемлемые результаты даст травитель, состоящий из йодистого калия, йода и воды (4:1:1) [56].

Медь, никель. Травление слоев меди может осуществляться в хлорном железе, разбавленной азотной кислоте ($HNO_3:H_2O=2:1$), или в составах, аналогичных используемым для травления алюминия: 1) 1 ч. ортофосфорной кислоты, 1 ч. воды; температура около 70°C; 2) 17 мл ортофосфорной кислоты, 17 мл азотной кислоты, 66 мл уксусной кислоты, 50 мл воды; температура около 30° С [59].

Титан. Используя дополнительную защиту слоем напыленного золота, травят в составе [60]: 65 см³ серной кислоты, 1 см³ фтористоводородной кислоты, 30 см³ воды. Слой титана толщиной 50 нм можно травить в смеси, состоящей из 10 ч 40%-ного раствора аммиака и 1 ч. 40%-ного раствора фтористоводородной кислоты.

Кермет. Рекомендуется применение „взрывной" фотолитографии, так как трудно подобрать травитель, обеспечивающий хорошее качество при обычном травлении. В работе [61] на маску позитивного резиста толщиной более 1 мкм наносили при температуре подложки 300° С подслой ванадия толщиной 0,5 мкм и затем слой кермета толщиной 0,2 мкм, после чего «взрывали» фоторезистивную маску в 54%-ной азотной кислоте.
В работе [41] на 1 ч. этого травителя добавляли 5 ч. этиленгликоля и 4 ч. воды. Такой состав позволяет проводить фотолитографию по золоту в системе золото — молибден, не действуя на молибден; скорость травления 0,36 мкм/мин.

Платина. Применяют нагретые смеси азотной кислоты с фтористоводородной (1:5, температура 70° С) [57] либо с соляной кислотой. В работе [58] для фотолитографии по платине используют толстый слой (1,0—1,4 мкм) позитивного фоторезиста. При травлении вначале пластины погружают в холодную воду, затем в нагретую до 70—80° С и только потом в травитель следующего состава: 1 ч. азотной кислоты, 9 ч. соляной кислоты, 10 ч. воды.

При температуре 70—80°C скорость травления слоя платины, полученного реактивным распылением, составляет 0,1 мкм/мин. Предварительный нагрев пластин в воде необходим для того, чтобы предотвратить термоудар фоторезиста, возникающий при травлении в горячем травителе и приводящий к отслаиванию резиста и подтравливанию по границам. Вторая сушка не применялась.

5. Вопросы обеспечения качества фотолитографии

От качества проведения фотолитографических операций зависит в основном процент выхода годных изделий на стадии опытно-конструкторских работ, в опытном и серийном производстве. Чем сложнее выпускаемое изделие, тем важнее роль фотолитографии. Например, по данным американской промышленности [62], при производстве маломощных транзисторов, когда на пластине содержится 10—20 тыс. структур, выход годных достигает 80%, а стоимость одной структуры не превышает 0,1 цента. При выпуске интегральных схем средней сложности на пластине находится около 1000 схем, выход годных составляет 50%, а стоимость структуры около 3 центов. И, наконец, производство БИС характеризуется следующими цифрами: 15—25 структур на пластине, выход годных около 20%, стоимость структуры около 10 долл., т. е. в 10 000 раз выше, чем стоимость транзисторной структуры.

Причина такого контраста заключается в том, что БИС имеют очень большие критические области, по площади иногда равные почти всей площади кристалла, и появление в пределах критической обасти хотя бы одного локального дефекта приводит к браку всей интегральной схемы. Локальные дефекты могут возникать в силу многих обстоятельств: находиться в исходном материале, вноситься при термических операциях эпитаксии, диффузии и окисления, оставаться на поверхности пластин при недостаточной очистке; но все же основным источником локальных дефектов служит фотолитография. Особенно это относится к применяемой в настоящее время контактной фотолитографии.

Помимо локальных дефектов при фотолитографии возможны и другие нарушения качества. В первую очередь, ими являются неточная передача заданных шаблоном размеров и плохое совмещение элементов. Крайним случаем неточной передачи размеров служит катастрофический брак: растравливание или полное стравливание структур из-за отслаивания фоторезиста. Влияние точности передачи размеров и точности совмещения на выход годных структур также сильно зависит от сложно-

сти изготавливаемого прибора. В простейшем случае для производства транзисторов применяют 4 фотошаблона, а для производства БИС — не менее 10 фотошаблонов. Фотошаблоны изготавляют с определенной ошибкой, которую можно оценить процентом точно совмещенных структур после данной операции совмещения. Если принять, что 80% структур на каждом шаблоне точно совмещаются, то для комплекта из 4 шаблонов общий выход годных (по совмещению) составит 30%, а для комплекта из 10 шаблонов — не более 4% [63].

Причины, приводящие к нарушению качества фотолитографии, можно разбить на следующие.

Локальные дефекты: собственные загрязнения в основном фоторезиста и в меньшей степени реактивов (проявитель, травители); загрязнения из окружающей среды, вносимые в результате деятельности производственного персонала, от контакта с технологической тарой и оборудованием; низкое качество фотошаблонов — проколы, остатки непрозрачной пленки в окнах, выколки стекла и т. д.; дефекты на поверхности подложки — загрязнения, остающиеся после отмывок, для эпитаксиальных пленок выступы высотой до 1 мкм; механические нарушения слоя фоторезиста в основном от манипуляции с пинцетом и вследствие попадания твердых частиц между шаблоном и резистом при контакте.

Неточная передача размеров: неоптимальные режимы проведения операций экспонирования, проявления, сушки и травления, а также отклонения от заданных режимов; плохой подбор фоторезиста и травителя для подложки данного типа (эти два фактора следует выбирать совместно, как составляющие единой системы); наличие зазора между шаблоном и слоем фоторезиста из-за искривления пластин, попадания между шаблоном и пластиной инородных частиц и т. д.; специфические особенности фотошаблона: меньшая, чем у хромированных, контрастность транспарентных шаблонов и возникающая в результате опасность появления «двойного края» или искажения конфигурации элементов.

Прежде чем рассматривать методы борьбы с перечисленными причинами нарушения качества, следует остановиться на одном важном положении. Литературные данные и опыт, накопленный отечественной полупроводниковой промышленностью, говорят о том, что проблему повышения качества фотолитографии можно

решить лишь при комплексном подходе. Только создание единой системы очистки и фильтрации (ЕСОФ) обеспечивает высокий выход годных изделий повышенной сложности. Недостаточно просто фильтровать фоторезист или отмывать тщательно пластины; необходимо наладить фильтрацию окружающего воздуха, всех газов, сжатого воздуха, воды, реактивов, организовать отмывку фотошаблонов и т. д. Комплексное решение проблемы качества фотолитографии – единственно правильный путь и любое недостающее звено может свести на нет остальные усилия.

Для фильтрации фоторезистов используют мембранные фильтры с различным диаметром пор. Такие фильтры выгодно отличаются от объемных малой неоднородностью размеров пор и высокой производительностью. Нетрудно понять, что, если даже малая часть пор будет иметь диаметр, больший номинального, в резисте останутся немногочисленные крупные частицы, каждая из них сможет вызвать нарушение целостности слоя резиста и фильтрация потеряет смысл.

Фильтры помещают на специальных сетках в фильтродержателе из нержавеющей стали или фторопласта. Резист продавливают сквозь фильтр, подавая очищенный воздух или инертный газ; уровень давления определяется размерами фильтра и диаметром пор. Обычно применяют двухстадийную фильтрацию; например, при изготовлении сложных КМОП БИС на первой стадии фильтруют большие объемы резиста сквозь фильтр размером 100—250 мм с диаметром пор 0,5—1,0 мкм, а затем уже на рабочем месте небольшие порции резиста продавливают сквозь фильтр размером 13—25 мм с диаметром пор 0,25 мкм. В фоторезистах встречаются два основных вида включений: механические, т. е. пылинки и другие взвешенные частицы, и химические. Например, в позитивных фоторезистах типа ФП-383 при недостаточно полной очистке светочувствительной составляющей могут оставаться частички исходного продукта (1,2-нафтохинондиазидсульфохлорида), снижающие защитные функции слоя — при проявлении в щелочных составах в местах химических включений происходит быстрое разрушение слоя и возникают локальные проколы. Помимо фильтрации эффективна очистка резистов центрифугированием, особенно вязких резистов: позитивных с высоким содержанием твердого продукта

и негативных на основе каучуков. Для получения, например, слоев толщиной 3—4 мкм используют позитивный фоторезист на основе продукта № 27, имеющий вязкость 30—50 сп. Отфильтровать такой вязкий резист можно только фильтром с диаметром пор около 5 мкм, что явно недостаточно для очистки. Для центрифугирования резистов применяют высокооборотные (6000—12 000 об/мин) центрифуги. Степень очистки определяется произведением ускорения (в единицах g) на время (в часах). В работе [64] рекомендуется поддерживать этот показатель на уровне 25 000 $g \cdot$ч. Данные этой работы по очистке вязкого негативного резиста центрифугированием (показатель 1300 $g \cdot$ч) и фильтрацией приведены на рис. 12. Степень очистки контролировалась по рассеянию света в резисте.

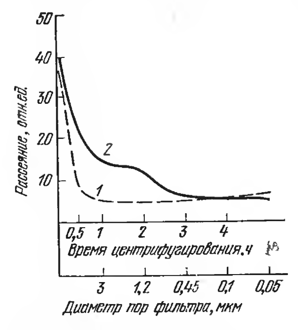


Рис. 12. Сравнение методов очистки фоторезиста центрифугированием (1) и фильтрацией (2).

Фильтрация сжатого воздуха, инертного газа и воды осуществляется мембранными фильтрами, которые изготовляют из нитроцеллюлозы, а фильтры для фоторезистов изготавливают из веществ, устойчивых к воздействию органических растворителей (например, из фторопласта или нейлона). Основной принцип всех приемов фильтрации заключается в том, что фильтр тонкой очистки должен быть максимально приближен к рабочему месту.

Вносимые извне загрязнения могут возникать из внешних или внутренних источников. Внешние источники загрязнения — это окружающая среда. Воздух, поступающий на участки фотолитографии, должен фильтроваться особенно тщательно.

Приведем простой пример. В сложных структурах (мощных СВЧ транзисторах и интегральных схемах) число элементов достигает нескольких тысяч, а критическая площадь составляет 5—20 мм^2. Приняв, что число фотолитографических операций равно 8, а общий выход годных 70%, найдем, что выход годных на каждой операции должен составлять минимум 96%. Предположим, далее, что брак при фотолитографии возникает за счет попадания между шаблоном и резистом твердых частиц, оседающих из окружающей среды в течение времени подготовки и проведения операции. Если считать, что эти частицы имеют некоторый средний диаметр, обладают одинаковой плотностью и энергия их распределена, например, в соответствии со статистикой Максвелла—Больцмана, то можно найти связь между количеством частиц, оседающих на единицу поверхности в единицу времени, и их концентрацией в воздухе. Для обеспечения на одной операции выхода годных, равного 96%, необходимо, чтобы за 10—15 мин контакта с окружающей средой на пластину диаметром 50 мм или на шаблон попало не более 8 частиц. Это соответствует скорости загрязнения 1 частица/см$^2\cdot$ч; пересчитав эту величину в концентрацию частиц в воздухе, найдем, что она не должна превышать 4 частиц/л. В 1 л воздуха обычного городского района содержится около 50 тыс. частиц. Следовательно, система фильтрации должна обеспечить снижение загрязненности в 10^4 раз.

Для того чтобы снизить расходы на фильтрацию воздуха, полупроводниковые предприятия располагают в зеленых зонах вне города, иногда под землей; планировка помещений базируется на принципе «куб в кубе», когда наиболее ответственные участки находятся во внутреннем объеме здания. Мощные кондиционеры, герметизация помещений, выполнение стен, полов и потолков из нестирающихся материалов — обязательные признаки производственных помещений.

Дальнейшее уменьшение загрязненности достигается использованием так называемых чистых комнат. Чистая комната представляет собой кондиционированное помещение, обычно с вертикальным ламинарным потоком воздуха. Размеры комнат, как правило, невелики, порядка 100 м^2. Это объясняется экономическими соображениями: стоимость очистки 1 м^3 воздуха от частиц размерами 5 и 0,5 мкм соотносится как 1:100. Важным условием является сведение к минимуму количества персонала, работающего в комнате и являющегося основным источником загрязнений.

В чистых комнатах удается поддерживать чистоту на уровне 3 частиц размером менее 0,5 мкм в 1 л возду-

ха. Наконец, внутри чистой комнаты устанавливают боксы с ламинарным потоком (они удобнее герметичных) для самых ответственных операций. Внутри боксов достижимо минимальное содержание частиц: не более 1 частицы в 1 л воздуха при размерах частиц менее 0,5 мкм.

Боксы на участке фотолитографии, кроме этого, позволяют экранировать наиболее чувствительные операции (нанесение и сушка резиста, экспонирование, проявление, вторая сушка) от внутренних источников загрязнений. Внутренние источники связаны с самими технологическими процессами (например, испарением щелочей, кислот), работой персонала и оборудованием.

Работа персонала является мощным и, к сожалению, неизбежным фактором, вызывающим загрязнения. С поверхности кожи человеческого тела выделяется в 1 мин до 1 млн. частиц микронных размеров: капельки пота, ороговевшие частицы, бактерии и т. д. [65]. Большое количество частиц выделяется в результате стирания полов в производственных помещениях. Нетрудно подсчитать, что если с поверхности пола площадью 1 см ^{2} стирается слой толщиной всего в 1 мкм, то образуется более 100 млн. пылинок со средним размером 1 мкм. Пылинки эти поднимаются в воздух и там находятся во взвешенном состоянии, со временем коагулируя, так что средний размер загрязнений возрастает примерно до 5 мкм.

Опыт показывает, что на участках фотолитографии сложных приборов обязательно требуется тройная фильтрация: общая очистка и кондиционирование — чистая комната — бокс с ламинарным потоком.

Это требование еще в большей степени относится к производству фотошаблонов, так как они являются эталонами, определяющими качество всей фотолитографии.

Не останавливаясь подробно на причинах возникновения дефектов фотошаблонов, приведем приближенную оценку связи дефектности фотошаблонов для приборов определенного класса с условиями изготовления фотошаблонов (табл. 6). Из таблицы видно, насколько усложняется производство шаблонов высокого класса и как растут требования к чистоте производства. В табл. 7 дополнительно приведено соотношение между выходом годных структур, критической площадью структуры и

Таблица 6

Условия изготовления фотошаблонов различных классов

Тип прибора	Критическая площадь, см²	Допустимая плотность дефектов, см²	Число шаблонов в комплекте	Материал фотошаблона	Методика изготовления фотошаблона	Способы обеспечения чистоты
Полупроводниковые приборы малой и средней мощности	10^{-3}	10	4—6	Фотопластинки; пластинки с напыленным хромом для дубликатов	Контактная перепечатка дубликатов	Общая фильтрация и кондиционирование
Мощные полупроводниковые приборы, средние интегральные схемы	10^{-2}	1	6—8	Фотопластинки особого отбора; фоторезистивные платы для дубликатов	То же	Общая фильтрация и кондиционирование; боксы с ламинарным потоком на ответственных операциях
Большие интегральные схемы	10^{-1}	0,1	8—12	Фоторезистивные платы	Проекционная перепечатка дубликатов	Общая фильтрация и кондиционирование; чистые комнаты, боксы с ламинарным потоком на ответственных операциях
Матрицы приборов с зарядовой связью	1,0 и более	0,01	8—10	Фоторезистивные платы особого отбора	Работа с эталонными шаблонами	Общая фильтрация и кондиционирование; чистые комнаты; боксы с ламинарным потоком на всех операциях

Таблица 7

Соотношение между выходом годных структур p, критической площадью структуры S и допустимой плотностью дефектов λ; расчет по распределению Пуассона $p = \exp(-S\lambda)$

Выход годных структур на одну операцию, %	Показатель степени $S\lambda$	Плотность дефектов λ для различных критических площадей S, $см^{-2}$				Выход годных, %	
		0,01 $см^2$	0,10 $см^2$	1,0 $см^2$	4,0 $см^2$	после 6 операций	после 7 операций
70	0,36	36	3,6	0,36	0,09	12	8,4
80	0,22	22	2,2	0,22	0,05	26	21
90	0,104	10	1,0	0,1	$2{,}5 \cdot 10^{-2}$	47	42
94	0,067	6,7	0,67	0,07	$1{,}7 \cdot 10^{-2}$	68	64
96	0,045	4,5	0,45	0,05	$1{,}25 \cdot 10^{-2}$	77	74

допустимой плотностью дефектов. Эта таблица полезна для ориентировочных расчетов допустимой дефектности шаблонов, загрязненности производственной среды, производительности проектируемого оборудования и так далее.

Шаблоны, используемые для фотолитографии, должны периодически контролироваться (выборочно) для определения реального износа. В комплекте не все шаблоны равноценны по допустимой плотности дефектов. Наиболее «критичные» шаблоны (например, шаблоны для получения контактных окон) следует менять чаще, чем остальные, так как их износ особо опасен, или же сразу включать в комплект по нескольку дубликатов одного шаблона.

Важную роль играет отмывка (очистки) фотошаблонов. На рабочей поверхности шаблонов при контактной фотолитографии всегда налипают остатки резиста, особенно при неоптимальных условиях первой сушки, когда резист остается «влажным», или при слишком сильном прижиме шаблона к слою. В производстве КМОП БИС, например, практикуют отмывку хромированных фотошаблонов через 6—10 контактов. Шаблоны помещают в ацетон и протирают тампоном, затем выдерживают в хромпике (1—1,5 мин), тщательно промывают деионизованной водой и сушат струей очищенного воздуха.

Весьма эффективно фотошаблоны очищаются в кислородной плазме.

Механические нарушения слоя фоторезиста от манипуляций пинцетами возникают в основном сразу же после его нанесения, когда слой находится в вязкотекучем состоянии, и после проявления, когда слой набухает. Как показали специальные исследования [66], для нарушения слоя достаточно минимальных усилий при контакте с пинцетом, даже если применяются фторопластовые наконечники. Для борьбы с этим видом брака для загрузки — выгрузки пластин рекомендуется применять специальные вакуумные пинцеты, присасывающие пластину с обратной стороны.

Одним из наиболее мощных источников дефектов является операция экспонирования и совмещения. Любая частица, попавшая между шаблоном и резистом при контакте может вызвать появление локального дефекта. Твердые частицы кремния и стекла механически нарушают слой резиста. Мягкие непрозрачные частицы, такие, как пылинки и волокна, в меньшей мере травмируют слой резиста, но могут локально экранировать поток света во время экспонирования, что при использовании позитивного резиста вызовет появление прокола. Приведем перечень практических мероприятий, снижающих дефектность на этой операции.

1. Тщательная протирка установки совмещения, периодический обдув чистым воздухом, размещение в боксе с ламинарным потоком.

2. Работа только с неповрежденными пластинами кремния; желательно, чтобы края их были закруглены травлением. При поломке пластины на установке следует тщательнейшим образом очистить столик, обдув его чистым воздухом.

3. Периодическая отмывка фотошаблонов, обдув чистым воздухом пластин перед контактом.

4. Контроль плоскостности пластин (нельзя работать с искривленными), а при использовании эпитаксиальных пленок — устранение выступов, например, посредством предварительного контактирования с бракованным шаблоном на специально выделенной установке совмещения.

Определяющую роль при проведении операции экспонирования и совмещения играет усилие контакта. В отечественных установках совмещения трудно или невоз-

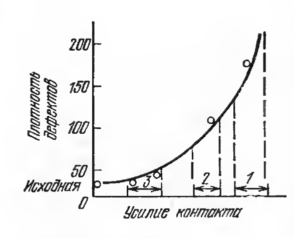


Рис. 13. Изменение плотности дефектов на шаблоне после 10 контактов с пластиной диаметром 75 мм для трех типов усилия:

1 — «мягкий» контакт (10—15 кг); *2* — «ультрамягкий» контакт (1—5 кг); *3* — режим «микроусилия» (9—200 г).

можно регулировать эту величину, причем считается, что чем больше усилие, тем надежнее контакт. Эта точка зрения сугубо неправильна, необходимо прикладывать точно дозированное усилие, которое определяется: требуемой от процесса разрешающей способностью; типом резиста; толщиной слоя и качеством сушки этого слоя; характеристиками применяемых подложек, в частности их неплоскостностью. Следовательно, конструкция установок совмещения должна позволять точно регулировать (и контролировать) усилие контакта. В последних моделях американских установок совмещения, например, предусмотрена работа в трех режимах. Стандартный режим — так называемый «мягкий» контакт — создается разряжением около $1 \cdot 10^4$ Па, что при диаметре пластины 75 мм означает усилие 13,6 кг между шаблоном и пластиной. Модификацией этого режима является «ультрамягкий» контакт, он характеризуется на порядок меньшим усилием. И, наконец, в режиме «микроусилия» общее усилие снижено до 30 г. На рис. 13 показана картина накапливания повреждений на шаблоне после 10 контактов в каждом из перечисленных режимов. Можно приближенно считать [67], что снижение усилия в 4 раза уменьшает дефектность шаблонов в 6 раз. Следует учитывать, что в режиме «микроусилия» снижается точность передачи, так как остаются зазоры между шаблоном и резистом, однако для большинства изделий, таких как БИС с размерами элементов более 5 мкм, этот режим приемлем. Кардинальное улучшение качества фотолитографии достигается автоматизацией процессов обработки и транспортировки пластин.

В настоящее время отечественная промышленность располагает автоматизированными установками, образующими линии фотолитографии. Примером может служить линия «Корунд», в которой основные процессы

обработки автоматизированы. Однако загрузка — выгрузка и транспортировка пластин производятся вручную. За полный цикл обработки пластина контактирует с технологической оснасткой или тарой много десятков раз. Приходится использовать 3—4 типа кассет, и многочисленные перекладывания из тары в тару не способствуют достижению высокого качества фотолитографии. Поэтому при конструировании современных линий фотолитографии значительное внимание приходится уделять проблемам транспортировки пластин, обеспечивающей минимум соприкасаний.

Наметились две основные тенденции, определяемые способом нанесения резиста. В первом варианте при конструировании линии используют кассетную загрузку—выгрузку и транспортировку пластин на воздушной подушке. Пластины поступают на вход линии в вертикальной кассете (20—50 пластин диаметром от 22 до 89 мм). Пневмосистема за короткое время (на 1 пластину требуется около 1 с) перемещает их в накопитель, откуда они по воздушной подушке попадают на 4—8 параллельно работающих центрифуги. Далее снова собираются пневмосистемой в кассету, передаются на сушку и т. д. В процессе всех обработок пластины подаются автоматически из кассет в установки или обрабатываются непосредственно в кассетах, в зависимости от характера технологической операции.

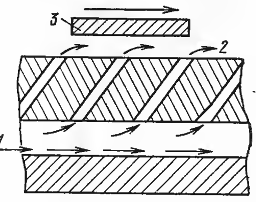


Рис. 14. Система транспортировки пластин на воздушной подушке:

1 — подача воздуха; *2* — несущий поток; *3* — пластина.

Устройство системы транспортировки пластин на воздушной подушке схематически показано на рис. 14. Чистый воздух продувается в узкие наклонные щели диаметром 0,6 мм и выходит на поверхность направляющей. За счет быстрого движения воздуха создаются местные разряжения, притягивающие пластину и толкающие ее вперед. Используя кассетные установки и транспортировку пластин на воздушной подушке, можно создать полностью автоматическую линию. Структура такой линии приведена на рис. 15.

Во втором варианте также используется кассетная загрузка — выгрузка, но система транспортировки конвейерная. На такой линии фоторезист наносится не

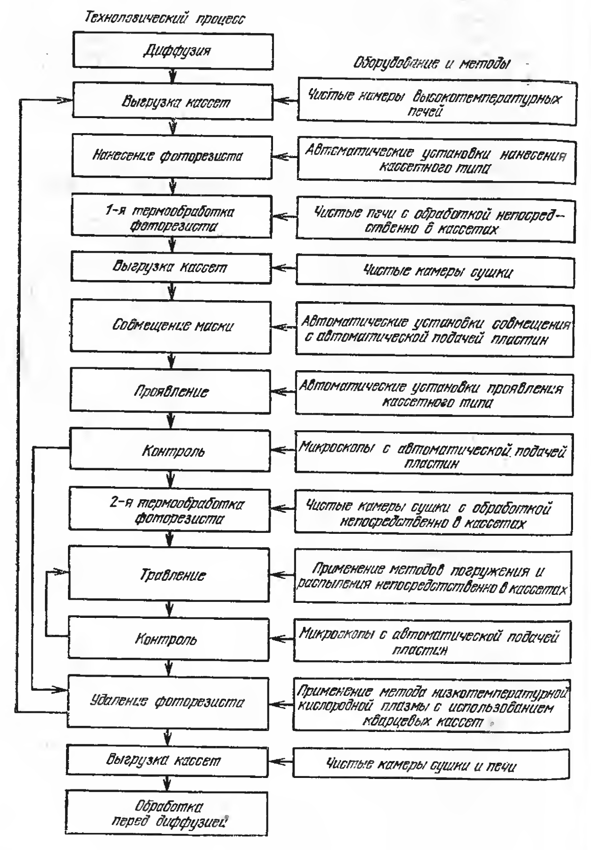


Рис. 15. Автоматическая линия фотолитографии.

центрифугированием, а распылением, так как пластины постоянно скреплены с конвейером.

Автоматическая линия фирмы In Line Technology (США) состоит из построенных по общему принципу трех установок: нанесения и сушки; проявления и задубливания; травления и (или) удаления резиста. В каждой установке движется конвейерная лента, на которой пластины расположны вертикально. Распылением осуществляется не только нанесение резиста, но и все остальные операции: проявление, отмывка, травление (подача проявителя, воды, чистого воздуха, травителя и т. д.) На входе и выходе установок находятся накопители, в которых пластины автоматически перегружаются с конвейера в кассеты с вертикальными пазами. При перегрузке используется не механичский захват, а устройство, работающее на принципе Бернулли (воздух, выходя из-под пластины, создает разряжение, и пластина мягко присасывается к устройству).

Рассмотрев причины появления локальных дефектов и методы борьбы с ними, можно сформулировать наиболее общие требования, выполнение которых необходимо для снижения плотности дефектов при фотолитографии:

1. Необходимо создать минимальную загрязненность окружающей среды, уменьшать время взаимодействия пластин с окружающей средой (т. е. ускорить операции и исключить простои) и поддерживать посстоянный ламинарный поток воздуха, предотвращающий оседание частиц на поверхность резиста.

2. Основное внимание следует обращать на чистоту в двух случаях: когда резист «влажен» (нанесение, первая сушка, после проявления) и при экспонировании — совмещении. Наибольшее количество дефектов возникает именно при контакте шаблона со слоем фоторезиста, поэтому кроме поддержания чистоты надо стремиться к тому, чтобы усилие контакта поддерживалось минимальным. Радикальным решением является переход на бесконтактную фотолитографию — проекционную и фотолитографию с зазором.

3. Снижению дефектов в значительной мере способствует автоматизация технологических операций и особенно процессов загрузки, транспортировки и выгрузки пластин; манипулирование пинцетами в производстве сложных приборов недопустимо.

Перейдем ко второй группе нарушений качества, связанных с неточной передачей размеров и плохим совмещением. Сразу же следует оговориться, что разделение на две группы носит условный характер, поскольку в фотолитографии факторы, определяющие появление дефектов или нарушение точности передачи, тесно связаны. Например, совмещение (не контактирование), казалось бы, не имеющее ничего общего с возникновением локальных дефектов, на практике оказывается критичной операцией: невнимательность оператора, выставившего слишком малый зазор при совмещении или искривление пластины могут привести к серьезным повреждениям фотошаблона и слоя резиста.

Подбор оптимальных режимов проведения фотолитографических операций обеспечивает требуемую точность передачи при минимуме дефектов; для оптимизации режимов могут быть рекомендованы два способа. Согласно первому из них на фотошаблон наклеивают сверху (с нерабочей стороны) непрозрачную маску с 16 квадратными отверстиями размером примерно 4×4 мм². Помещают поверх маски экран и, сдвигая его, задают различные выдержки, т. е. различные дозы энергии экспонирования. Проэкспонированную таким образом пластину проявляют также ступенчато, опуская в проявитель по одному ряду отверстий на заданное время; при этом направление должно быть перпендикулярным направлению изменения экспозиции. Таким обазом, на каждой пластине кремния с нанесенным на ней слоем фоторезиста определенной толщины можно получить 16 зон с различными условиями экспонирования и проявления. Измеряя при соответствующем увеличении размеры проявленных элементов и сопоставляя их с размерами тех же элементов на фотошаблоне, находят ту зону, в которой точность передачи размера близка к единице. Если таких зон несколько, выбирают зону, для которой время проявления минимально (чтобы плотность дефектов была минимальной). Иногда не удается получить требуемый результат сразу, тогда опыт повторяют, изменяя время экспонирования и проявления.

Второй способ заключается в использовании ступенчатого оптического клина, помещаемого поверх фотошаблона. Оптический клин позволяет изменять дозу при одной и той же выдержке. Выпускаемые промышленностью оптические клинья характеризуются, как правило, небольшим изменением оптической плотности от поля к полю (например, 10-польный клин, применяемый в полиграфии, имеет градации оптической плотности 0,22; 0,34; 0,44; ...; 2,57). Это позволяет точно подобрать экспозицию, но сужает диапазон ее изменения. Для расширения диапазона экспозиций можно использовать непрозрачный экран с вмонтированным в него оптическим клином: сдвигая экран с клином, получают на пластине 3—4 отпечатка с различными выдержками. При этом появляется возможность ступенчатого проявления: каждый из отпечатков выдерживают в проявителе разное время. В результате на одной пластине реализуют 30 режимов экспонирования и проявления.

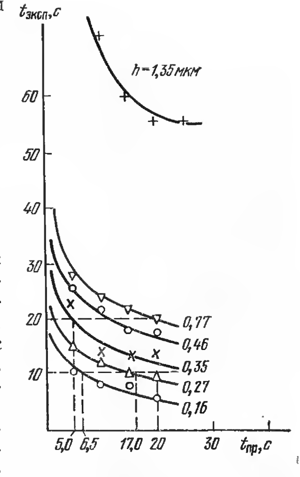


Рис. 16. Зависимости времени проявления от экспозиции, снятые методом ступенчатого экспонирования и проявления для различных толщин фоторезиста ФП-383 (проявитель буферный).

На рис. 16 приведены экспериментальные зависимости, полученные описанными способами на слоях фоторезиста ФП-383, толщина которых изменялась от 0,16 до 1,35 мкм. Каждая точка на кривых соответствует точности передачи размера, равной 1±0,05. Нетрудно убедиться, что времена проявления и экспонирования связаны между собой обратно пропорциональной зависимостью. Если выбрать фиксированное значение времени экспонирования и провести соответствующую этому значению прямую, параллельную оси абсцисс, то пересечение ее с кривыми точной передачи, снятыми для слоев различной толщины, даст оптимальные значения времени проявления. Теоретически было показано [28], что эти времена пропорциональны квадрату толщины слоя h_c:

$$t_{пр} = \frac{kh^2_c}{t_{эксп}}; \quad \frac{t_{пр1}}{t_{пр2}} = \left(\frac{h_{c1}}{h_{c2}}\right)^2; \quad t_{пр2} = t_{пр1}\left(\frac{h_{c2}}{h_{c1}}\right)^2.$$

Экспериментально из кривых рис. 16 для времени экспонирования $t_{эксп}=10$ с получаем время проявления слоя толщиной 0,16 мкм, равное $t_{пр1}=6,5$ с; для слоя толщиной 0,27 мкм, $t_{пр2}=17$ с. Расчетное же время проявления составляет $t_{пр2}=6,5\ (0,27/0,16)^2=18$ с, что достаточно близко к экспериментальному результату. Аналогично для $t_{эксп}=10$ с экспериментальные времена проявления слоев толщиной 0,35 и 0,77 мкм равны 5 и 20 с, а расчетные 5 и 24 с. Характерной ошибкой при подборе оптимальных режимов является то, что, подбирая режим для новой толщины слоя резиста, меняют время экспонирования, а проявляют в течение того же времени.

Часто удается добиться точной передачи размеров на стадии проявленного рельефа фоторезиста, но при травлении возникает значительное растравливание и качество процесса в целом резко ухудшается. Особенно часто растравливание и увеличение размеров наблюдаются на фосфоросиликатном стекле; травление пленок алюминия характеризуется заметно худшей воспроизводимостью, чем травление окисла на кремнии.

Качество травления можно улучшить, повышая температуру второй сушки, но при этом приходится учитывать возможное оплавление резиста по краю изображения, в результате чего мелкие элементы не вытравливаются. Решать проблему качества травления следует подбирая оптимальное сочетание типа фоторезиста, травителя и подложки. Например, уже отмечалось, что для фотолитографии на фосфоросиликатном стекле наиболее пригоден фоторезист ФП-РН-7. Хорошее качество фотолитографии на любых подложках получается при использовании фоторезистов на основе резольной смолы и продукта № 27 [11]. Эти примеры говорят о значении правильного подбора резиста. Заметное влияние на качество оказывает травитель. Так, в работе [11] отмечается, что, применяя для травления окисла вместо обычного буферного травителя ($HF:NH_4F:H_2O=1:3:7$) смесь серной кислоты с удельным весом 1,135 и фторида аммония в соотношении 2:1, удается заметно улучшить точность передачи размеров и одновременно увеличить скорость травления от 0,06 до 0,22 мкм/мин.

При травлении особенно полно проявляется зависимость качества от характеристик подложки, а поскольку эти характеристики связаны с другими технологическими процессами, то и от степени отработанности технологии в целом. Конечно, и на стадиях, предшествующих травлению, характеристики подложек играют важную роль. Например, изменение режимов напыления алюминиевых пленок приводит к колебаниям отражательной способности подложек и в результате изменяются условия экспонирования; окисление поверхности алюминия может вызвать плохое смачивание и скатывание резиста при нанесении. Однако именно на травлении сильнее всего сказываются колебания свойств подложек и отклонения режимов других технологических операций — окисления, диффузии, отмывки, причем брак после травления неисправим.

Приведем конкретный пример того, как качество травления может быть улучшено за счет корректировки режимов диффузии и окисления, предшествующих фотолитографии. Нами проводились исследования точности передачи размеров при травлении двухслойной системы фосфоросиликатное стекло — двуокись кремния, полученной в различных режимах диффузии фосфора и последующего окисления. На полированных пластинах кремния выращивали слои окисла с различной толщиной (0; 0,14; 0,25 и 0,35 мкм), поверх них наносили слои фосфоросиликатного стекла диффузией фосфора при 950° С в течение 5 и 30 мин. Часть пластин затем подвергали окислению при 1000° С в течение разного времени (0; 15 и 60 мин). Таким образом создавались сочетания слоев окисла и стекла с разной толщиной и концентрацией фосфора в стекле. Фотолитографию проводили стандартным образом с фоторезистом ФН-РН-7. В результате исследований было выяснено следующее. Фотолитография по одному фосфоросиликатному стеклу (т. е. нанесенному непосредственно на кремний может быть достаточно точной: точность передачи $П=1,04$ ($П=(a-a_0)/a_0$, где a и a_0 — размер после травления и исходный на шаблоне). При травлении двухслойной системы стекло — окисел, не подвергаемой окислению после диффузии фосфора, достичь точной передачи размеров не удается; в среднем $П=1,4—1,5$. Проведение даже непродолжительного окисления после диффузии фосфора значительно улучшает точность передачи: достаточно примерно 10 мин, чтобы точность передачи стала не хуже $П=1,1$. Параметры диффузионных слоев и стабилизирующие свойства фосфоросиликатного стекла

при таком окислении изменяются незначительно, и, если подобная обработка допустима, ее следует вводить для улучшения качества фотолитографии. Приведенные соображения говорят о том, что следует продуманно подбирать систему резист — травитель — подложка. В работе [11] даны рекомендации по выбору подобных систем (табл. 8).

Таблица 8

Оптимальные системы фоторезист—травитель—подложка

Подложка	Фоторезист	Травитель
Окисел	ФП-РН-7, Р-27, Н-27, Р-83, Р-7	$HF:NH_4F:H_2O=1:3:7$
Фосфоросиликатное стекло	ФП-РН, Р-27, Р-7	$HF:NH_4F:H_2O=1:3:7$
	Р-27, ФП-РН-7, Р-7	80 г хромового ангидрида, 14 г фторида аммония, 40 г кадмия уксуснокислого, 0,1 г. крахмала, до 1 л воды
Алюминий	Н-27	H_3PO_4 (1,87 г/см^3) при 70°C; $H_3PO_4:CH_3COOH:HNO_3:H_2O=12:5:2:1$ (20°C)
Хром	Н-27	Соляная кислота с активатором

Примечание. Р, Н—резольная или новолачная смола в самостоятельно приготовленных фоторезистах на основе продуктов № 27, 83, 7.

В заключение перечислим ряд практических методов, направленных на улучшение качества фотолитографии и, в первую очередь, на снижение плотности дефектов.

«Двойная» фотолитография. Возможны две разновидности этого метода. Одна из них заключается в том, что наносят слой фоторезиста, сушат, экспонируют вдвое меньшей дозой, чем нужно для полного разрушения резиста (относится к позитивному резисту) и проявляют в течение времени также вдвое меньше оптимального. Затем пластину промывают от проявителя, проводят

первую сушку и снова экспонируют, но используя фотошаблон с другим распределением локальных дефектов. Таким шаблоном может быть просто другой дубликат, если эталонный шаблон не содержал локальных дефектов и все дефекты вносились на стадии изготовления дубликатов, либо дубликат, сделанный с другого эталона, характеризуемого своим распределением локальных дефектов. В простейшем случае используют тот же шаблон, что и на первой стадии, но сдвигают его на шаг. Точно совмещают второй шаблон с проявленным рельефом и проводят экспонирование с половинной дозой. Проявив (половинное время) слой после второго экспонирования, получают полностью открытые элементы, в местах же расположения локальных дефектов слой резиста разрушен только наполовину и сквозной прокол не возникает. Возможен вариант, по которому на первой стадии слой не проявляют, а при совмещении используют зеленый интерференционный фильтр, с помощью которого удается выделить экспонированные области, изменившие отражающую способность по той причине, что в них большая часть молекул нафтохинондиазида разрушена светом. Этот вариант предпочтителен, так как щелочной проявитель сам по себе создает локальные дефекты в слое фоторезиста.

Согласно второму методу сначала проводят полностью все операции фотолитографии, за исключением травления подложки, например, окисленного кремния. Травление окисла осуществляют наполовину. Затем удаляют резист, моют подложку и подвергают ее повторной обработке; допустимо использовать, например, обработку ИК излучением. На обработанную подложку снова наносят слой фоторезиста, сушат, совмещают и экспонируют, используя шаблон с другим распределеним локальных дефектов, проявляют, проводят вторую сушку и, наконец, дотравливают окисел в окнах до конца. Локальные дефекты до конца при этом не дотравливаются. Существует, однако, реальная опасность того, что в местах дефектов маскирующая способность окисла нарушается, даже если он и травился вдвое меньшее время, чем это требуется для полного протравливания.

Оба метода «двойной» фотолитографии снижают производительность, и поэтому применяют их при крайней необходимости, например при создании контактных окон, где малейший прокол вызывает брак.

«Двойные» фотошаблоны. Изготавливают рабочий хромированный дубликат, имеющий некоторое распределение сквозных дефектов и зеркальный дубликат с другим распределением сквозных дефектов (с другого эталонного шаблона или со сдвигом на шаг). Затем на рабочий дубликат с помощью пиролиза наносят пленку двуокиси кремния толщиной 0,4—0,8 мкм и на нее пленку хрома. Наносят резист и экспонируют его через зеркальный дубликат, совмещая его с выступающими из-под пленки хрома контурами рабочего дубликата. Разделяющий слой двуокиси кремния препятствует травлению нижнего слоя хрома. Сквозные дефекты обоих слоев хрома не совпадают, так что в итоге получается фотошаблон без проколов. Более того, «двойные» фотошаблоны намного устойчивее к износу, чем обычные, так как при стирании верхнего слоя хрома нижний надежно экранирует резист от попадания света. Эти два достоинства подобных фотошаблонов оправдывают некоторое усложнение процесса их изготовления.

Фотолитография с подслоем. Этот прием используется, как правило, в двух случаях: для травления окисла и фосфоросиликатного стекла на тех операциях фотолитографии, когда особенно опасны проколы, и для травления в составах, воздействия которых резист не выдерживает.

На подложку наносят слой металла, обладающего к ней хорошей адгезией и не травящегося в составе, используемом для травления подложки. Далее проводят фотолитографию и вытравливают окна в металлическом подслое одним травителем, а окна в подложке другим. При фотолитографии по окислу и примесносиликатным стеклам чаще всего в качестве подслоя используют молибден, который травят в смеси ортофосфорной, уксусной, азотной кислот и воды (75 : 15 : 3 : 5) при температуре 18°С. Окисел и стекло этот состав не травит. Проколы в шаблоне и в слое фоторезиста, естественно, передаются слою молибдена и далее окислу. Однако, как показывает опыт, размеры проколов в окисле при использовании подслоя получаются намного меньшими, чем при травлении без подслоя. Очевидно, это объясняется тем, что боковое подтравливание окисла (в месте дефекта) при маскировке одним резистом выражено сильнее, чем при дополнительной маскировке металлом, хорошо адгезирующим с поверхностью окисла. Иногда нанесение

подслоя сочетают с «двойной» фотолитографией, т. е. после вытравливания окон в молибдене снова наносят резист, проводят совмещение с дубликатом, имеющим другое распределение дефектов, экспонируют, проявляют, сушат и травят окисел в окнах.

В тех случаях, когда резист не выдерживает воздействия травителя, в качестве подслоя используют химически пассивный металл, такой, как золото. Применяя подслой золота, травят например титан [60].

«Взрывная» фотолитография. Метод взрывной или как ее иногда называют «обратной» фотолитографии позволяет существенно снизить уровень дефектов; в ряде случаев метод оказывается единственно возможным.

Сущность метода заключается в том, что на подложке создают маску из фоторезиста, наносят на нее какое-либо вещество (чаще всего металл) и затем в растворителе удаляют резист. В результате остаются только те участки, в которых наносимое вещество попало на подложку. При взрывной фотолитографии важно, чтобы были разрывы между материалом, нанесенным на подложку и на поверхность резиста. В противном случае или «взрыв» не произойдет, или придется применять принудительное удаление, например воздействием ультразвуковых колебаний. Для того, чтобы избежать соединений, необходимо обеспечить два условия: боковые поверхности резистивной маски должны быть вертикальными (клин проявления минимален) и наносимый материал должен поступать к подложке под углом, близким к нормальному. Последнее условие выполняется при напылении металла в вакууме с резистивным или электронно-лучевым испарителем, отстоящим от подложки на большое расстояние (около 40 см). При реактивном распылении, наоборот, осаждаемый материал попадает на подложку под самыми различными углами.

Фоторезист наносят слоем, толщина которого должна составлять 2—3 толщины слоя наносимого металла. После непродолжительной сушки (при 80° С в течение 10 мин в термостате; толщина слоя около 2 мкм [68]) экспонируют, проявляют изображение и создают таким образом маску. Вторую сушку не проводят, так как она приводит к закруглению краев рельефа из фоторезиста. По этой же причине необходимо тщательно контролировать температуру подложки в процессе напыления.

Основная проблема этого метода фотолитографии — адгезия осаждаемого материала к подложке. Для того чтобы обеспечить хорошую адгезию, применяют различные методы обработки свободных от резиста участков поверхности подложки: ионное травление, очистку в тлеющем разряде, очистку в кислородной плазме. Последний метод наиболее эффективен, так как применим почти для любых подложек и полностью удаляет органические загрязнения. Обработка пластин кислородной плазмой в течение времени, требуемого для удаления слоя резиста толщиной примерно 10нм, полностью очищает поверхность [69].

При использовании для взрывной фотолитографии позитивного резиста удаление маски с нанесенным металлом осуществляют в ацетоне, диоксане, диметилформамиде, моноэтаноламине.

Негативно-позитивная фотолитография. Метод основан на применении как негативного, так и позитивного фоторезистов в различных сочетаниях. При этом облегчается операция совмещения и снижается плотность дефектов.

Раздельное использование негативного и позитивного фоторезистов в одном процессе основано на следующих соображениях: проколы на шаблоне опаснее непрозрачных «островков» из-за накапливания проколов по мере эксплуатации; на тех операциях фотолитографии, где не допускаются проколы (в окисле), критические области фотошаблона следует выполнять прозрачными и применять негативный фоторезист; на тех операциях фотолитографии, где не допускаются «островки» окисла или металла критические области шаблона следует также выполнять прозрачными и применять позитивный фоторезист.

При изготовлении, например, биполярного транзистора фотолитографию базы и эмиттера можно проводить на позитивном резисте, контактных окон — на негативном. Точно так же имеет смысл применять негативный резист для фотолитографии под изолирующую диффузию в интегральных схемах.

Одновременное использование негативного и позитивного фоторезистов для одной операции фотолитографии позволяет создать практически бездефектную защитную маску, так как резисты проявляются в различных составах проявителей, каждый из которых воздействует только на «свой» слой. Механические дефекты слоев и дефекты, вносимые фотошаблонами, практически не перекрываются, т. е. сквозные проколы должны отсутствовать. Сначала наносят слой позитивного фоторезиста, сушат его, экспонируют, проявляют и задубливают. Затем наносят негативный фоторезист, сушат, совмещают изображения, экспонируют (желательно на шаблонах учесть различие в реакции на переэкспонирование у негативного и позитивного резистов), проявляют и задубливают. Такая двухслойная позитивно-негативная фотолитография с успехом применяется при гальваническом осаждении металлов.

6. Пути развития фотолитографии

Можно сформулировать основные тенденции, определяющие прогресс фотолитографии: повышение разрешающей способности, проявляющееся в разработке методов проекционной фотолитографии и особенно в переходе от оптической фотолитографии к рентгеновской и электронно-лучевой литографии; улучшение реального качества процесса, в первую очередь снижение плотности локальных дефектов за счет повышения производственной чистоты, автоматизации процесса, сокращения числа операций (например, создание рисунка без шаблона, т. е. непосредственно на рабочей пластине).

Проекционная фотолитография осуществляется по схеме, показанной на рис. 17. Изображение фотошаблона проецируется на подложку, покрытую слоем фоторезиста. Для осуществления проекции необходим сложный специализированный объектив, обеспечивающий высокое разрешение на поле диаметром, равном диаметру подложки. Именно сложность создания подобных объективов сдерживала и сдерживает в известной мере развитие проекционного метода фотолитографии.

Одной из лучших современных установок проекционной фотолитографии является установка «Микролайн», модель 100 фирмы «Перкин-Элмер» (США), обеспечивающая при масштабе проекции 1:1 получение линий шириной 2 мкм на поле диаметром 75 мм. На некоторых моделях установок применяют другие масштабы проекции: 2:1, 4:1 и 10:1. Так, использование в установ-

ке фирмы «Каспер» (США) масштаба 10:1 позволяет получать линии шириной 1 мкм, но рабочее поле при этом уменьшается, так что приходится производить несколько последовательных экспонирований (до 25 на пластине диаметром 75 мм). В отечественной практике успешно эксплуатируется установка модели UB-50, разработанная народным предприятием «Карл-Цейсс Иена» (ГДР).

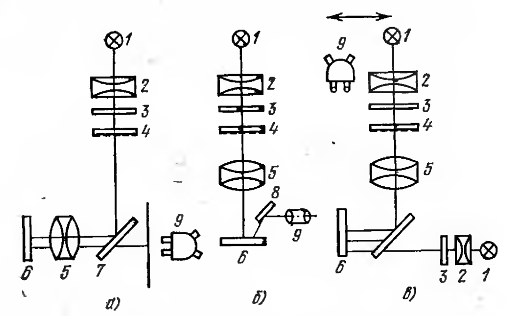


Рис. 17. Способы осуществления проекционной литографии:
а — одновременное проецирование и совмещение; б — совмещение в пространстве изображения; в — обратное отображение. 1 — источник; 2 — конденсор; 3 — фильтр; 4 — фотошаблон; 5 — объектив; 6 — подложка; 7 — полупрозрачное зеркало; 8 — зеркало; 9 — микроскоп.

Проекционная фотолитография позволяет получить разрешение выше, чем контактная, поскольку в последней вредную роль играют дифракционные явления, возникающие в зазоре между шаблоном и фоторезистом; устранить этот зазор при использовании контактной фотолитографии практически не удается. Кроме того, при проекционной фотолитографии резко снижается плотность локальных дефектов тоже за счет устранения контакта, при котором, как уже отмечалось выше, в слой резиста вдавливаются пылинки, микрочастицы стекла и кремния, а также происходит экранирование света любыми непрозрачными частицами, попадающими между шаблоном и резистом. Проекционная фотолитография, однако, предъявляет высокие требования к плоскостности подложек и однородности толщины слоя резиста. Это связано с тем, что при проекционной фотолитографии для повышения разрешающей способности объектива применяют

Таблица 9

Сравнение различных методов литографии

Характеристика процесса	Оптическая фотолитография		Рентгеновская литография	Электронно-лучевая литография	
	контактная	проекционная		сканирующая	полная проекция
Длина волны излучения, нм	300	300	0,4—1,4	0,01	0,01
Практическое разрешение, мкм	0,6—1,0	0,4—1,0	0,7	0,1—0,15	1,0—2,0
Шаблон	Стеклянный с хромовым покрытием	Стеклянный	Кремниевый с золотым покрытием	Не нужен	Сложный фотокатод
Время экспонирования (стандартная пластина)	Секунды	Десятки секунд	От нескольких секунд до нескольких минут	От нескольких минут до нескольких часов (сложные рисунки)	Десятки секунд

Продолжение табл. 9

Характеристика процесса	Оптическая фотолитография: контактная	Оптическая фотолитография: проекционная	Рентгеновская литография	Электронно-лучевая литография: сканирующая	Электронно-лучевая литография: полная проекция
Совмещение	Визуальное, фотоэлектрическое		С помощью датчика; рентгеновского излучения	С помощью специального датчика электрического сигнала	
Достоинства	Простота, высокая производительность	Отсутствие износа шаблонов, более чистые условия, отсутствие дифракции в зазоре между шаблоном и резистом	Отсутствие контакта при обеспечении высокой разрешающей способности, высокая производительность, относительная простота (пластина не в вакууме)	Отсутствие шаблона, высокая разрешающая способность	Высокие производительность и разрешающая способность
Недостатки	Износ шаблонов и повреждение слоя при контакте, дифракция в зазоре между шаблоном и резистом	Сложная оптика, мощные УФ осветители, трудности фокусировки высокоразрешающих объективов	Трудности фокусировки рентгеновских лучей, необходимость вакуумной системы для источника	Сложное оборудование, помещение пластины в вакуум, трудности совмещения, низкая производительность	Сложное оборудование, помещение пластины в вакуум, трудности совмещения, сложности изготовления шаблонов-фотокатодов

излучение, близкое к монохроматическому; в результате возникают интерференционные эффекты и стоячие волны в слое резиста. Доза излучения, получаемая слоем, гораздо сильнее зависит от толщины слоя и ее колебаний по пластине (и от пластины к пластине), чем при контактной фотолитографии. Производительность проекционной фотолитографии ниже, так как большая часть излучения поглощается стеклом многолинзового объектива и выдержку приходится увеличивать.

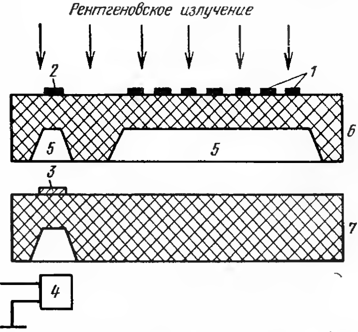


Рис. 18. Принцип рентгеновской литографии:

1 — непрозрачный рисунок фотошаблона (слой золота, толщиной 0,5 мкм); 2, 3 — маркерные знаки; 4 — детектор рентгеновского излучения; 5 — окна, вытравливаемые в кремнии; 6 — кремниевый фотошаблон; 7 — пластина кремния.

Тем не менее можно с уверенностью сказать, что в ближайшие 2—3 года проекционные методы фотолитографии займут прочное место в производстве сложных полупроводниковых приборов и интегральных схем. Изготовить, например, матрицу, содержащую несколько сотен тысяч приборов с зарядовой связью и имеющую размеры кристалла 25×25 мм, можно только методом проекционной фотолитографии.

С точки зрения дальнейшего повышения разрешающей способности интересны работы по рентгеновской литографии. Как видно из табл. 9, в которой сравниваются различные методы литографии, рентгеновская литография позволяет получать размеры элементов около 0,1 мкм [70].

Принцип метода рентгеновской литографии поясняется рис. 18. Поток мягких рентгеновских лучей (ускоряющее напряжение 8 кВ), который можно создать с помощью, например, системы электронно-лучевого испарения металлов с алюминиевой мишенью, падает на шаблон, изготовленный из кремниевой пластины. В пластине толщиной 200 мкм вытравлено большое окно, так что перемычка на дне окна составляет примерно 3—5 мкм. При этом ослабление рентгеновского излучения не превышает 3 дБ. С противоположной стороны перемычки создают рисунок, непрозрачный для рентгеновских лучей. Для этого используют пленку хром — золото толщиной 0,03 и 0,3 мкм соответственно. Сам рисунок получают с помощью сканирующего электронного микроскопа. Под шаблоном располагают подложку, покрытую резистом (полиметилметакрилатом). Время выдержки при экспонировании составляет несколько минут.

Для того, чтобы обеспечить совмещение шаблона и подложки, приходится вытравливать дополнительные окна и наносить на их дно метки совмещения. Расположенный снизу подложки под метками совмещения детектор рентгеновских лучей формирует сигнал рассогласования на нуль-орган системы совмещения.

Более подробно технология изготовления фотошаблона для рентгеновской литографии выглядит следующим образом. В пластину кремния, ориентированную в плоскости (100), проводят диффузию бора с концентрацией $2\cdot10^{19}$ $см^{-3}$ на глубину, соответствующую желаемой толщине перемычки. Затем формируют рисунок на поверхности, легированной бором, и травят кремний с обратной стороны в селективном травителе, состоящем из смеси этилендиамина, пирокатехина и воды (при температуре 115° С). Этот травитель растворяет слаболегированный кремний любого типа проводимости и плохо травит сильнолегированные слои, так что процесс прекращается на границе с диффузионным слоем. Интересно отметить, что столь тонкая кремниевая перемычка остается достаточно прочной: при толщине 3,5 мкм и размерах 2,5×2,5 мм она выдерживает давление до $1\cdot10^5$ Па.

Рассмотрим достоинства и недостатки метода рентгеновской литографии.

Высокая разрешающая способность — минимальный размер может составлять 50 нм при использовании из-

лучения медной мишени; для алюминиевой мишени около 100 нм. Ограничение разрешающей способности связано с тем, что источник излучения имеет конечные размеры и не является точечным, а также с появлением при взаимодействии излучения с резистом электронов Оже и фотоэлектронов. Первый эффект носит чисто геометрический характер и размытие края δ, связанное с ним, определяется выражением $\delta=z(d/D)$, где z — зазор между шаблоном и резистом; d — размер источника (пятна на мишени); D — расстояние от мишени до резиста. Практически $z=3$ мкм, $d=1$ мм, $D=3$ см, т. е. $\delta=100$ нм. Для уменьшения размытия желательно снижать зазор, не изменяя отношение d/D, от которого зависит экспозиция. При достаточно плоских подложках это вполне возможно; можно также работать при контакте шаблона со слоем резиста, тогда z равно толщине слоя, а размытие для слоя 500 нм составляет всего 16,7 нм.

Разрешающая способность реально ограничена величиной поглощения рентгеновского излучения металлическим рисунком шаблона. Применять тонкие пленки металла нельзя из-за их малого поглощения и снижения контрастности, а вытравить в более толстых пленках рисунок с малыми размерами затруднительно.

Отсутствие контакта с резистом — величину зазора находят из компромисса между желанием увеличить разрешающую способность и снизить уровень дефектов. На практике используют зазор 3 мкм, поскольку размеры пылинок и других загрязнений составляют 1—2 мкм. При изготовлении структур размерами 2—3 мкм допустимо работать при зазоре 10 мкм.

Нечувствительность к загрязнениям, так как они не поглощают рентгеновского излучения. Однако следует помнить, что вторичные электроны поглощаются и рассеиваются пылинками и другими инородными частицами.

Отсутствие проблем, связанных с отражением и рассеянием излучения, также является одним из достоинств рентгеновской литографии. В электронно-лучевой литографии, как известно, эти эффекты играют серьезную роль, ограничивая ее возможности.

Независимость от типа резиста, поскольку в принципе одинаковая разрешающая способность достигается на полимерах, как деструктирующих, так и сшивающих-

под действием излучения. На практике, однако, предпочитают использовать позитивный резист типа полиметилметакрилата, так как у негативных резистов после проявления уменьшается толщина (по сравнению с исходной).

Работа не в вакууме — поглощение излучения в воздухе составляет 4,5 дБ на 1 см, в гелии оно снижается до 0,01 дБ.

Простота и низкая стоимость по сравнению с электронно-лучевой литографией. Проще, чем в электронно-лучевой литографии, осуществляется и процедура совмещения. При рентгеновской литографии возможно и обычное оптическое совмещение сквозь окна, вытравленные в фотошаблоне. Было продемонстрировано, что такой способ обеспечивает точность около 1 мкм. Точность совмещения с помощью рентгеновского детектора может достигать 100 нм.

К недостаткам рентгеновской литографии следует отнести, в первую очередь, значительные выдержки при экспонировании. В слое полиметилметакрилата толщиной 500 нм поглощается всего 5% падающего потока (алюминиевая мишень). Для экспонирования такого слоя требуется при напряжении 8 кВ, токе 50 мА и диаметре пятна на мишени 1 мм выдержка около 20 мин. В последнее время, однако, разработаны специально для рентгенографии резисты в 100—200 раз более чувствительные и обеспечивающие хороший контраст [71]. Дальнейшее снижение выдержки может быть достигнуто за счет использования медной мишени.

Другим недостатком является наблюдавшееся явление дисторсии проявленного изображения. Поскольку рентгеновское излучение распространяется прямолинейно от точечного источника, эта дисторсия может быть вызвана лишь дисторсией изображения на шаблоне. В кремниевой перемычке, как выяснилось, механические напряжения малы, однако после создания на ней металлического рисунка (золото) возникают значительные напряжения и вследствие этого дисторсия. Для конкретной конфигурации (квадратная площадка золота со стороной 200 мкм в центре перемычки размерами 2×2 мм) изгиб составляет 300 нм, что соответствует радиусу кривизны 2 см. Боковая дисторсия при этом не превосходит 100 нм. Подбирая режимы нанесения пленки золота, можно, очевидно, снизить уровень дисторсии.

В настоящее время рентгенолитография еще не вышла из стадии лабораторных разработок. Тем не менее с ее помощью уверенно получают субмикронные элементы (на площади диаметром 2—5 мм). Описано применение рентгенолитографии для создания диодов и транзисторов, акустических линий задержки с периодом 1,55 мкм и шириной линии 0,7 мкм, дифракционных решеток с периодом 360 нм [69].

Дальнейшее повышение разрешающей способности обеспечивают электронно-лучевые методы (см. табл. 9). Не останавливаясь на принципах электронно-лучевой литографии, достаточно полно освещенных в литературе [20, 69], рассмотрим достигнутый к настоящему времени уровень развития этих перспективных методов.

Освоены два основных метода электронно-лучевой литографии: сканирования сфокусированным пучком электронов и электронной проекции всего изображения. Для обработки резистов сфокусированным пучком используются растровые электронные микроскопы или специализированные установки типа JEBX-2B (Япония). В этой установке пластина, покрытая резистом, располагается на столике, перемещающемся с высокой точностью (±0,5 мкм) на расстояние до 50×50 мм. Максимальная площадь сканирования пучка не превышает 2×2 мм, скорость сканирования может меняться от 10 до 40 см/с. Минимальная ширина экспонируемой линии составляет примерно 1 мкм. Все операции по управлению пучком и столиком осуществляет ЭВМ. Использование для литографии растрового электронного микроскопа позволяет получить линии шириной около 0,1 мкм на площади до 6 см^2.

Метод сканирования электронным пучком обладает серьезным недостатком — он требует большего времени экспонирования и тем большего, чем меньше ширина экспонируемой линии. От этого недостатка свободен метод проекционной электронно-лучевой литографии. Сущность метода и схема устройства для его осуществления поясняются рис. 19. Основным элементом устройства является трехслойный фотокатод. Для создания фотокатода на кварцевую отполированную пластину наносят тонкий слой титана, в котором вытравливают требуемое изображение. Вытравленные области служат в дальнейшем источником фотоэлектронов. Далее титан окисляют до окиси титана, поглощающей УФ излучение,

и затем на всю поверхность напыляют пленку палладия толщиной 4 нм. При освещении обратной стороны кварцевой пластинки ультрафиолетовым светом палладий эмиттирует фотоэлектроны с энергией не более 0,1 эВ. Плотность потока электронов составляет 100 мкА/см^2. Ускоряющее электрическое поле напряженностью 10 кВ/см и коаксиальное магнитное поле обеспечивают перенос в масштабе 1:1 электронного изображения на кремниевую подложку. Параметры системы таковы: минимальный размер элемента около 1 мкм, диаметр рабочего поля более 125 мм, глубина фокуса 25 мкм, время экспонирования примерно 5 с (общее время обработки определяется скоростью откачки до высокого вакуума). Такие характеристики не может обеспечить ни одна оптическая система.

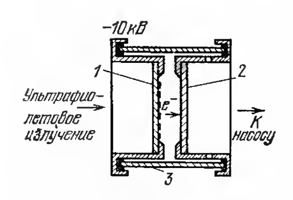


Рис. 19. Устройство для проекционной электронно-лучевой литографии:

1 — фотокатод; *2* — пластина (мишень); *3* — стеклянная трубка (металлизированная).

Метод электронно-лучевой проекции имеет два недостатка. Основной из них связан с совмещением. Можно осуществлять совмещение с помощью устанавливаемой в опорной рамке подложки, на которой производят предварительную литографию. Затем эту подложку контролируют под оптическим микроскопом и определяют ту коррекцию, какую необходимо ввести в отклоняющие катушки. Скорректированное изображение переносят на рабочую подложку, установленную в ту же рамку: точность при этом составляет ±2 мкм. Гораздо большую точность (до долей микрона) обеспечивает способ совмещения, основанный на контроле проводимости, вызванной взаимодействием электронного пучка с окислом. К сожалению, при этом приходится создавать на подложках специальные детекторы (как минимум, два), с которых снимают информацию о движении луча. К детекторам, представляющим собой МОП-конденсаторы, приходится подводить соединительные выводы, что, конечно, резко усложняет совмещение. Следует подчеркнуть, что описанные методы совмещения пока еще не нашли достаточного практического применения.

Вторым недостатком метода полной проекции является необходимость создания сложных фотокатодов с высоким разрешением. Изготавлять такие фотокатоды целесообразно на рассмотренных выше установках со сканирующим электронным лучом (производительность при этом не будет играть значительной роли), т. е. оба метода электронно-лучевой литографии не исключают, а дополняют друг друга.

Список литературы

1. **Динабург М. С.** Светочувствительные диазосоединения и их применение. М., «Химия», 1969.
2. **Боков Ю. С.** Фоторезисты. Ин-т «Электроника», 1969, с. 125. (Обзоры по электронной технике, вып. 59).
3. **Clark K. N. Y.** Photoresist in seimiconductor technology. — «Microelectronics», 1971, № 10, p. 25—31.
4. **Боков Ю. С., Корсаков В. С., Лаврищев В. П.** и др. Новые негативные фоторезисты. — «Электронная техника. Сер. 6. Микроэлектроника», 1970, вып. 4, с. 101—103.
5. **Вавилов А. Г.** Свойства фоторезистов на основе циклокаучука с бисазидами. — «Обмен опытом в радиопромышленности», 1971, вып. 1, с. 56—61.
6. **Динабург В. А.** и др. Исследование физико-химических свойств позитивных фоторезистов. — «Электронная техника. Сер. 2. Полупроводниковые приборы», 1972, вып. 7, с. 17—49.
7. **Горон А. Г., Боков Ю. С.** Фотографические характеристики позитивных фоторезистов на основе О-нафтохинондиазидов. — «Электронная техника. Сер. 6. Материалы», 1971, вып. 5, с. 36—40.
8. **Скворцов А. М.** и др. Получение микрорисунков в напыленных слоях алюминия фотолитографическим методом. — «Вопросы радиоэлектроники. Сер. 3. Полупроводниковые приборы. 1965, вып. 6, с. 60—65.
9. **Боков Ю. С., Корсаков В. С., Малышева М. С., Горон А. Г.** К исследованию фототехнических характеристик позитивных фоторезистов на основе О-нафтохинондиазидов. — «Электронная техника. Сер. 6. Материалы», 1972, вып. 1, с. 108—112.
10. **Резвый Р. Р., Концевой Ю. А., Пресс Ф. П.** Исследование слоев позитивных фоторезистов с применением метода лазерной эллипсометрической микроскопии. — «Электронная техника. Сер. 2. Полупроводниковые приборы», 1973, вып. 10, с. 36—39.
11. **Раснецова Б. Е., Белевич Г. М., Колмакова Г. Я.** Оптимизация процесса фотолитографии путем выбора системы подложка — фоторезист — травитель. — «Электронная техника. Сер. 7. Технология, организация производства и оборудование», 1974, вып. 3, с. 3—12.
12. **Носиков С. В., Пресс Ф. П.** Электронографический метод исследования слоев двуокиси и нитрида кремния. — «Электрон. пром-сть», 1971, № 1, с. 69—73.
13. **Lekas T.** High purity photoresist for microelectronics production. — «Sol.-St. Technol.», 1973, v. 16, № 12, p. 70—71.
14. **Ерусалимчик И. Г.** и др. Исследование некоторых физико-химических свойств негативных фоторезистов. — «Электронная техника. Сер. 2. Полупроводниковые приборы», 1974, вып. 7, с. 86—90.
15. **Hatzakis M.** Electron-sensitive resist for microfabrication. — «J. Vacuum Sci. Technol.», 1974, v. 11, № 1, p. 95.

16. **Глазштейн Л. Я., Кораблин А. С.** Полимерные резисты для электронографии. Ин-т «Электроника», 1972 (Обзоры по электронной технике, вып. 12).
17. **Paal G., Strähle U. D., Kielhorn G.** New high sensitive electron resist materials. — «J. Electrochem. Soc.», 1973, v. 120, № 12, p. 1714—1716.
18. **Roberts E. D.** The preparation and properties of a polysiloxane electron resist. — «J. Electrochem. Soc.», 1973, v. 120, № 12, p. 1716—1721.
19. **Bowden M. J., Thompson L. F.** Poly (styrene-sulfone) — a sensitive positive electron beam resist. — «J. Electrochem. Soc.», 1974, v. 121, № 12, p. 1620—1623.
20. **Федотов Я. А., Поль Г. И.** Фотолитография и оптика. М., «Сов. радио», 1972.
21. **Kerwin R.** Photosensitive materials. — «Bell. Syst. Techn. J.», 1970, v. 49, № 9, p. 2079—2192.
22. **Szupillo R. E.** Chromium Masks. — «Sol.-St. Technol.», 1969, v. 12, № 7, 8.
23. **Рубцов И. Н.** и др. Классификация дефектов фотошаблонов. — «Электронная техника. Сер. 2. Полупроводниковые приборы», 1972, вып. 7, с. 112—115.
24. **Белокопытов В. И.** и др. Цветные фотошаблоны на основе пленки Fe_2O_3. — «Электрон. пром-сть», 1974, № 8, с. 43—44.
25. **Sullivan M. V.** Iron oxide see-throgh photomasks. — «J. Electrochem. Soc.», 1972, v. 120, № 4, p. 545—550.
26. **Березин Г. Н. и др.** О природе «двойного края» при контактной фотолитографии. — «Электронная техника. Сер. 3. Микроэлектроника», 1973, вып. 7, с. 13—36.
27. **Progress** in IC photomasking. — «Electronic Packaging and Production», 1973, v. 13, № 5, p. 31, 32, 37, 40, 44.
28. **Мазель Е. З., Пресс Ф. П.** Планарная технология кремниевых приборов. М., «Энергия», 1974.
29. **Ерусалимчик И. Г., Пресс Ф. П., Трифаи А. М.** Исследования зависимости качества фотолитографии от обработки подложки. — В кн.: Полупроводниковые приборы и материалы. Кишинев, Политехн. ин-т, 1973, с. 77—86.
30. **Kodak** photoresist seminar Proc. Eastman Kodak Co. N. Y v. I, II, 1968.
31. **Elliott D.** Photoresists: making the most of what you've got (better processing needed to fully utilize resists imaging capability). — «Circuits Manufact.», 1970, v. 10, № 12, p. 52—53.
32. **Looking** for a mask aligner. — «Circuits Manufact.», 1971, v. 11, № 2, p. 28—31.
33. **Федоров Н. Н., Овчаров В. Ф.** Плазмохимическая обработка поверхности пластин в производстве полупроводниковых приборов и ИС. — «Зарубежная электронная техника», 1974, № 14, с. 3—47. (Ин-т «Электроника»).
34. **Irving S.** Oxidation in photoresist removal process. — «Sol.-St. Technol.», 1971, v. 14, № 6, p. 47—51.
35. **Голышев В.** и др. Плазмо-химическое удаление фоторезиста.— «Электронная техника, Сер. 3. Микроэлектроника», 1973, вып. 2, с. 88—92.
36. **Федоров Ю. И., Бондаренко С. Д.** Применение кислотостойких светочувствительных эмульсий для получения локальных неоднородностей с высоким разрешением на монокристаллах и

пленках германия и кремния. — В кн.: Поверхностные и контактные явления в полупроводниках. Томск. ун-т, 1964, с. 476—490.
37. **Елецкая Г. Н., Рябченко Л. Н.** Создание глухих отверстий на кремнии и германии методом фотолитографии. — В кн. Вопросы микроэлектроники. Киев, «Наукова думка», 1971, с. 92—96.
38. **Fullor C. S., Allison H. W.** A polishing etchant for III—V semiconductors. — «J. Electrochem. Soc.», 1962, v. 109, № 9, p. 880.
39. **Gannon J .J., Nuese C. J.** A chemical etchant for the selective removal of GaAs through SiO_2 masks. — «J. Electrochem. Soc.», 1974, v. 121, № 9, p. 1215—1219.
40. **Травление** полупроводников. Пер. с англ. Под ред. С. Н. Горина. М., «Мир», 1965.
41. **Штраусе Л. С., Ивченко А. Е.** Особенности процессов фотогравировки при изготовлении интегральных микросхем. — «Электронная техника. Сер. 7. Технология, организация производства и оборудование», 1974, вып. 4, с. 44—48.
42. **Максимова Л. И.** и др. Воспроизведение рисунков микронных размеров с использованием методов контактной фотолитографии. — «Электронная техника. Сер. 7. Технология, организация производства и оборудование», 1974, вып. 4, с. 39—43.
43. **Патент Японии** № 34214, кл. 99/5.
44. **Маркова Т. П., Янсон В. Ю.** Фотогравировка защитной композиции моноокись кремния — свинцовоборосиликатное стекло. — «Электронная техника. Сер. 14. Общетехническая», 1970, вып. 4, с. 71—78.
45. **Патент** США № 2606766 кл. 204-192.
46. **Расиецова Б. Е., Белевич Г. М., Колмакова Т. Я.** Травление пленок хрома при изготовлении хромированных фотошаблонов.— «Электронная техника. Сер. 7. Технология, организация производства и оборудование», 1974, вып. 4, с. 49—51.
47. **Патент** США № 3367806 кл. 156-17.
48. **Пресс Ф. П.** Фотолитография в производстве полупроводниковых приборов. М., «Энергия», 1967.
49. **Патент** США № 3532569 кл. 156-22.
50. **Вавилов А. Г., Бычева В. А., Митяева Л. А.** Разрешающая способность слоев фоторезиста на основе циклокаучука с бисазидами. — «Журн. науч. и приклад. фотографии и кинематографии», 1972, т. 17, вып. 3, с. 180—185.
51. **Курносов А .И., Климовицкая А. В.** Исследование процессов получения молибденовых трафаретов (масок) на основе химического и электролитического травления. — «Электронная техника. Сер. 2. Полупроводниковые приборы», 1969, вып. 5, с. 8—13.
52. **Гусев В. К., Никишин В. И., Никитина Т. А.** Перспективы применения тугоплавких металлов для изготовления маскирующих покрытий фотошаблонов. — «Электронная техника. Сер. 7. Технология, организация производства и оборудование», 1974, вып. 6, с. 12—16.
53. **Качурина Е. Е., Немировский Л. Н., Анохин Б. Г.** Нанесение тонких слоев вольфрама на кремний водородным восстановлением. — «Электронная техника. Сер. 2. Полупроводниковые приборы», 1970, вып. 4(54), с. 91—97.
54. **Shankoff T. A., Chandross E. A.** High resolution tungstem pattering using buffered, midly basic etching solutios. — «J. Electrochem. Soc.», 1975, v. 122, № 2, p. 294—298.

55. **Патент** США № 355951 кл. 204-15, приоритет от 4.08.67.
56. **Патент** США № 3388048 кл. 204-15, приоритет от 7.12.65.
57. **Патент** США № 3836446 кл. 204-192, приоритет от 17.09.74.
58. **IC Pattern** generation — resist process. — «Electronic Packaging and Production», 1970, № 8, p. 114—117.
59. **Вавилов А. Г., Бычева В. А., Митяева Л. А.** Разрешающая способность слоев фоторезистов на основе циклокаучука с бисазидами. — «Журн. науч. и приклад. фотографии и кинематографии», 1972, т. 17, вып. 3, с. 180—185.
60. **Патент** США № 3388048 кл. 204-15, приоритет от 7.12.65.
61. **Лубашевская А. В.** и др. — «Вопросы электроники». Сер. Общетехническая», 1968, вып. 9, с. 29—34.
62. **Baumann D.** Touchless wafer handling. — «Sol.-St. Technol.», 1973, v. 16, № 3, p. 45—49.
63. **Looking** for a mask aligner. — «Circuits Manufacturing», 1974, № 6, p. 84—90.
64. **Laming F. P., Straile R. E.** Photoresist cleaning. — «J. Electrochem. Soc.», 1972, v. 120, № 2, p. 293—295.
65. **Hope D.** Coutamination problems in semiconductor Industry. — «Enviromental Eng.», 1968, v. 11, № 35, p. 9—12.
66. **Тюлягин В. Е.** Исследование видов и причин брака при производстве кремниевых интегральных схем. — Тезисы докладов на Всесоюз. межвуз. конф. по прогнозир. надежности изделий электрон. техники. Сер. 1. Киев, 1971.
67. **Novak W. J.** Wafer printing for higher Fields. — «Electronic Packaging and Production», 1974, v. 14, № 9, p. 39—40.
68. **Henry I., Smith Frank J., Bachuer, N. Efremov.** A High field photolitographic technigue for surface wave devices. — «J. Electrochem. Soc.», 1971, v. 118, № 5, p. 821—825.
69. **Henry I., Smith.** Fabrication techniques for surface acoustic wave and thin film optical devices. — «Proc. IEEE», 1974, v. 62, № 10, p. 1361—1387.
70. **Фрэнсон И.** Развитие рентгено-лучевой литографии. — «Электроника», 1974, № 17, с. 77—80.
71. **Thompson L. F., Feit E. D., Bowden M. J., Lengo P. V., Spencer E. G.** Polymeric resists for X-ray lithography. — «J. Electrochem. Soc.», 1974, v. 121, № 11, p. 1500—1503.

Оглавление

ИБ № 301

ФЕЛИКС ПАВЛОВИЧ ПРЕСС

Фотолитографические методы в технологии полупроводниковых приборов и интегральных микросхем

Редактор **М. М. Лисина**
Художественный редактор **Н. С. Шеин**
Технический редактор **И. В. Орлова**
Корректор **З. Г. Галушкина**

Сдано в набор 27.12.77 Подписано в печать 12.04.78 Т-07552
Формат 84×108/32 Бумага типографская № 1 Литературная гарн.
Высокая печать Объем 5,04 усл. п. л. 5,58 уч.- изд. л.
Тираж 17 000 экз. Зак. 575 Цена 30 к.

Издательство «Советское радио», Москва, Главпочтамт, а/я 693
Московская типография № 10 «Союзполиграфпрома»
при Государственном Комитете Совета Министров СССР
по делам издательств, полиграфии и книжной торговли.
Москва, М-114, Шлюзовая наб., 10.